



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y**  
**CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO Y VIABILIDAD DE LA ORIENTACIÓN EXTERNA DIRECTA EN  
LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS DE OBJETO CERCANO**

**Febrero, 2015**

**Alumna: Marta García López**

**Tutor: Julián Aguirre de Mata**  
**Cotutor: Andrés Díez Galilea**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA**  
**Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE INGENIERO TÉCNICO EN TOPOGRAFÍA**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO Y VIABILIDAD DE LA ORIENTACIÓN EXTERNA DIRECTA**  
**EN LEVANTAMIENTOS FOTOGRAFÉTRICOS DE OBJETO**  
**CERCANO**

**Febrero 2015**

**Alumna: Marta García López**

**Tutor: Julián Aguirre de Mata**  
**Cotutor: Andrés Díez Galilea**





## **Agradecimientos**

A mi familia por el apoyo incondicional recibido durante todo este tiempo

A mis amigos por todos los ánimos y consejos

A mi tutor Julián Aguirre y a mis compañeros del laboratorio por toda la ayuda que me han prestado

A Ana Domingo por su amabilidad al resolverme las dudas planteadas

**Dedicado a Rodrigo de Antonio Moledo**



1. Introducción.....	8
2. Objetivos del proyecto.....	10
3. Metodología.....	12
3.1. Instrumentos utilizados.....	13
3.1.1. Instrumentos topográficos.....	13
3.1.2. Trípodes.....	14
3.1.3. Cámaras fotográficas.....	14
3.1.4. Guía epipolar.....	18
3.1.5. Barra de escala.....	19
3.2. Obtención de imágenes.....	19
3.2.1. Imágenes de la cámara primaria.....	20
3.2.2. Imágenes de la cámara secundaria.....	21
3.3. Medida del panel de calibración.....	21
3.3.1. Preparación de la calibración.....	21
3.3.2. Red Topográfica.....	24
3.3.3. Leica Axyz.....	25
3.3.4. Observaciones topográficas del panel de calibración.....	27
3.4. Medida del panel de test.....	28
3.4.1. Preparación del sistema.....	28
3.4.2. Observaciones topográficas del panel de test.....	29
3.4.3. Tomas de las cámaras.....	30
3.5. Orientación interna. Calibración.....	31
3.6. Metodologías para la obtención de coordenadas.....	43
3.6.1. Coordenadas del panel de test por topografía.....	43
3.6.2. Coordenadas del panel de test por fotogrametría.....	43
3.6.2.1. Pares fotogramétricos con cámara primaria.....	43
3.6.2.2. Pares fotogramétricos con cámara primaria utilizando parámetros externos.....	43
3.6.2.3. Pares fotogramétricos con cámara secundaria.....	54
4. Análisis matemático de los resultados obtenidos.....	60
4.1. Introducción.....	61



4.2. Procesos de control de calidad cartográfica.....	61
4.3. Utilización del NSSDA.....	62
4.4. Tablas de resultados.....	65
5. Conclusiones.....	68
6. Presupuesto.....	71
7. Bibliografía.....	74

El proyecto consiste en determinar las coordenadas de un panel de test por diferentes métodos y comparar los resultados obtenidos mediante calidad posicional. Los métodos serán los siguientes:

- Por topografía clásica
- Por fotogrametría
  - Una cámara convencional (cámara primaria) realizará una pasada con tres fotografías del panel de test, se orientarán los dos pares y se restituirán para obtener coordenadas.
  - Midiendo una serie de marcas de la cámara primaria que serán transformadas desde otro sistema de coordenadas al sistema test podremos calcular los parámetros de orientación externa por métodos geométricos.
  - Otra cámara convencional (cámara secundaria) realizará tres pasadas con tres fotografías cada una de la cámara primaria para medir fotogramétricamente las marcas de esta cámara y así poder repetir el proceso de orientación directa.

El resultado final de la orientación directa no ha sido válido ya que no hemos podido obtener resultados por este método.

Como posibles soluciones se propone utilizar un sensor de giro o hacer un estudio en un futuro proyecto fin de carrera.



## 1. INTRODUCCIÓN



Podemos definir la fotogrametría como la técnica que estudia y define con precisión las formas, las dimensiones y la posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto. Lo que estamos acostumbrados a estudiar, ya que es lo más demandado, es que en fotogrametría aérea estas fotografías estarán tomadas desde un avión para la realización de mapas topográficos a escala pero nuestro proyecto se centrará en la fotogrametría de objeto cercano.

La fotogrametría de objeto cercano es aquella en donde la medición se produce en fotogramas de escala muy grande obtenidos desde la superficie terrestre. Se utiliza una cámara convencional fija apoyada sobre el terreno, cuyos ejes son horizontales, paralelos entre si y perpendiculares a la base.

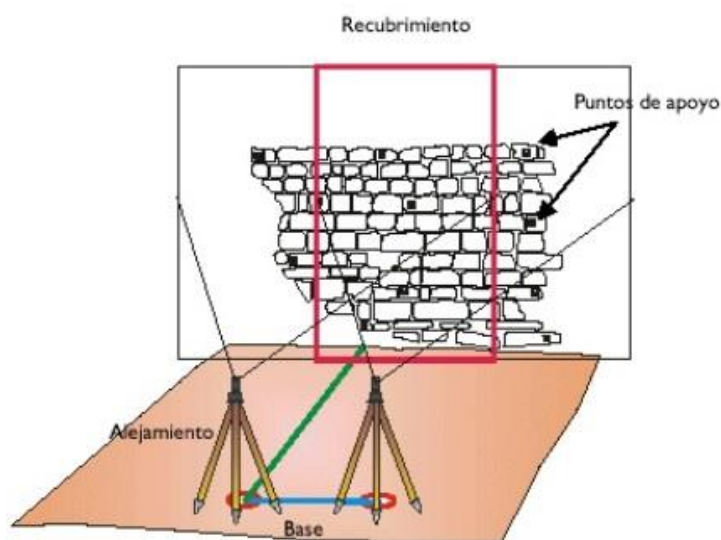


Figura1. Ejemplo fotogrametría objeto cercano

Normalmente el proceso fotogramétrico se realiza siguiendo los pasos del método general de la fotogrametría mediante la orientación externa indirecta o realizando el proceso con la orientación relativa y la absoluta conjuntamente. Sin embargo, el objetivo de este proyecto fin de carrera es realizar el proceso fotogramétrico de manera directa.



## 2. OBJETIVO

La metodología que queremos probar consiste en poder calcular los parámetros de orientación externa (coordenadas del centro de proyección del sensor y giros del eje de la cámara) de una forma directa e independiente de cualquier otro elemento, ya que si comparamos con fotogrametría aérea, la manera de obtener esta orientación es mediante la combinación de un GPS y de un IMU que irán montados dentro del avión. El GPS (Sistema de Posicionamiento Global) medirá y calculará las coordenadas de los centro de proyección y el IMU (Unidad de Medida Inercial) posee tres acelerómetros y tres giróscopos que calculan los giros.

A parte de comprobar la viabilidad del método también compararemos los resultados con los obtenidos mediante distintas orientaciones indirectas para verificar a través de qué método se obtienen mejores precisiones.

Para poder llevar a cabo este proyecto dispondremos principalmente de dos cámaras y un panel de test que será nuestro objeto a analizar por las diferentes metodologías. La cámara primaria se encargará de tomar fotografías del panel mientras que la cámara secundaria realizará fotografías de la cámara primaria. A su vez un teodolito electrónico y una estación total se encargarán de medir las coordenadas de los puntos de apoyo, los puntos situados en el panel y en la cámara primaria. De esta manera podremos conseguir coordenadas no sólo por topografía sino que también por fotogrametría.

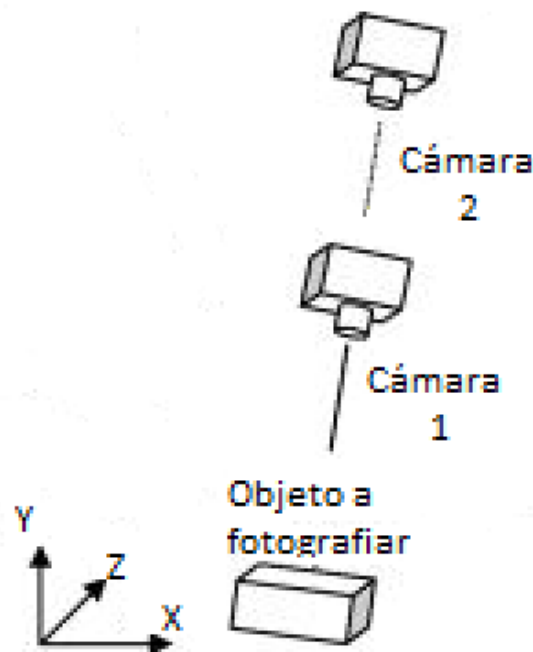


Figura 2. Tomas fotográficas de ambas cámaras



### 3. METODOLOGÍA

### 3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

#### 3.1.1 Estaciones totales

Antes de comenzar las mediciones por topografía clásica se decidió que los instrumentos a utilizar serían, una estación total TC-2002 y un teodolito electrónico T-2000, ambos de Leica, conectados al equipo Axyz de la misma casa. Esta decisión fue tomada debido a que con esta instrumentación alcanzaríamos a priori las precisiones requeridas para nuestro proyecto. Esta precisión está condicionada por el tamaño del píxel en las imágenes a tomar, siendo en nuestro caso de 0,152 mm.

Datos técnicos generales	TC-2002	T-2000
Aumentos del anteojo	30X	30X
Precisión de estabilización del compensador	0.3"/0.1 mgon	0.3"/0.1 mgon
Sensibilidad del nivel de burbuja	4'/2mm	4'/2mm
Sensibilidad del nivel electrónico	2"	2"
Precisión Hz, V	0,5"/0,15 mgon	0,5"/0,15 mgon
Precisión referida a mediciones a prismas estándar	1mm+2ppm	1mm+2ppm



Figura3. Leica TC2002



Figura4. Leica T2000

### 3.1.2 Trípodes

Durante la toma de datos, tanto la estación total como el teodolito electrónico irán montados sobre trípodes destinados a aplicaciones industriales. Estos trípodes son más robustos y estables que los de campo gracias a materiales más sólidos y a la sujeción fija de las patas sobre suelos lisos.



Figura 5. Trípode robusto

### 3.1.3 Cámaras fotográficas

Como cámara primaria vamos a utilizar una Olympus E500. Esta cámara de 8MPix tiene un sensor de 3264\*2448 píxeles y 5,31 micras de resolución, dotada de un objetivo ZUIKO DIGITAL 14-45 mm.



Figura 6. Cámara primaria Olympus E500

La focal nominal utilizada será de 14 mm elegida por dos razones, la primera es que con una focal de 14 mm (focal pequeña) tenemos una amplitud de campo visual bastante amplia, por lo que así reduciremos el número de tomas a realizar. La otra razón por la que se eligió esta distancia focal es porque se trata de uno de los extremos del objetivo, así, si se tienen que repetir trabajos para este proyecto nos resultará más fácil colocar el objetivo en el lugar deseado, en el extremo. Además, por seguridad, para evitar movimientos en el objetivo, se fijó éste con una cinta autoadhesiva.



Analizando el entorno donde se realizó la toma, atendiendo a la iluminación del laboratorio, se decidió utilizar una apertura del diafragma de F11. La decisión de utilizar una apertura del diafragma mayor o menor obedece a una cuestión de incluir distorsión o difracción. La distorsión se calculará en la calibración, por lo que el hecho de que haya más o menos, no influye en la elección final. Sin embargo la presencia de difracción se traduce en una falta de nitidez en la imagen, la cual deberíamos evitar si queremos conservar una resolución real en la misma y poder realizar medidas precisas sobre ella. Cuanto más se cierre el diafragma (mayor número f) más difracción se va a incluir, más difusa va a quedar la imagen.

Atendiendo a estos parámetros elegidos, resulta que tenemos que emplear una distancia de alejamiento del objeto de 700 mm.

Todo ello se utiliza para calcular los parámetros que regirán la toma fotográfica en el presente proyecto. Estos parámetros se han calculado a partir de los datos de entrada anteriormente explicados con ayuda de una hoja Excel.

En primer lugar, calculamos el tamaño del píxel (resolución) en el objeto a partir del tamaño del sensor de la cámara en milímetros y en píxeles (datos que tenemos por los parámetros técnicos de la cámara).

$$\text{Tamaño píxel} = \frac{\text{Tamaño sensor(mm)}}{\text{tamaño sensor(pixel)}} = 5,31 \mu\text{m}$$

También podemos obtener la escala de la imagen a partir del alejamiento y la distancia focal:

$$E = \frac{\text{Alejamiento}}{f} = 50$$

Por otra parte, fijando el recubrimiento longitudinal en un 80 %, se obtiene un valor para la base aérea o distancia de avance entre fotogramas de:

$$b = \text{AnchoSensor} * \text{Avance (\%)} = 3,460 \text{ mm}$$

$$\text{Base} = b * \text{Escala} = 0,17 \text{ m}$$

A continuación se muestra la tabla con los parámetros calculados en el proyecto de vuelo de la toma fotográfica:

OLYMPUS E500			
Cámara apaisada			
	Ancho	Alto	
Tamaño sensor	3264	2448	Píxeles
	17,3	13	Milímetros
Círculo de confusión	0,015		Milímetros
Tamaño píxel imagen	5,300	5,310	Micras
Semidiagonal	10,820		Milímetros
	2040		Píxeles
Distancia focal	14		Milímetros
	2642		Píxeles
Alejamiento	0,7		Metros
Diafragma	11		
Hiperfocal	1,20		Metros
Distancia cercana y lejana	0,44	1,66	Metros
Fotobase	3,460		Milímetros
Tamaño píxel objeto	0,265		Milímetros
Tamaño sensor objeto	0,865	0,650	Metros
Relación Base/Alejamiento	1 / 4,0		
Error altimétrico	0,0008		Metros
Error planimétrico	0,0003		Metros
Recubrimiento total	0,692	0,325	Metros
Distancia avance	0,173		Metros
Separación pasadas	0,325		Metros
Dimensiones del objeto	1,65	1,15	Metros
Número de pasadas	1		Pasadas
Número de fotos/pasada	6		Fotos
Denominador de Escala	50		Adimensional
Recubrimiento Longitudinal	80		Porcentaje
Recubrimiento Transversal	50		Porcentaje

Figura 7. Proyecto de vuelo cámara primaria

Para evitar el contacto directo con la cámara en la toma de imágenes, y eliminar así cualquier posibilidad de moverla de manera involuntaria, se conectó a un ordenador portátil, pudiendo controlarla remotamente. Esto era posible gracias al software Olympus Studio, el cual permite controlar los parámetros más importantes desde el mismo ordenador, así como previsualizar las imágenes realizadas.



Como cámara secundaria vamos a utilizar una Canon 450D. Esta cámara de 18MPix tiene un sensor de 4274 \* 2848 pixeles y 5,2 micras de resolución, dotada de un objetivo Tamron 17-50mm.



Figura 8. Cámara secundaria Canon 450D

La focal nominal utilizada será de 17 mm y emplearemos una distancia de alejamiento del objeto de 900 mm.

$$\text{Tamaño pixel} = \frac{\text{Tamaño sensor(mm)}}{\text{tamaño sensor(pixel)}} = 5,2 \mu\text{m}$$

$$E = \frac{\text{Alejamiento}}{f} = 50$$

b = AnchoSensor \* Avance (%) = 3,330 mm

Base= b \* Escala = 0,17 m

A continuación se muestra, igual que en la cámara primaria, la tabla con los parámetros calculados del proyecto de vuelo de la toma fotográfica:

CANON 450D			
Cámara apaisada			
	Ancho	Alto	
Tamaño sensor	4274	2848	Píxeles
	22,2	14,8	Milímetros
Círculo de confusión	0,019		Milímetros
Tamaño píxel imagen	5,194	5,197	Micras
Semidiagonal	13,341		Milímetros
	2567,984618		Píxeles
Distancia focal	18		Milímetros
	3466		Píxeles
Alejamiento	0,9		Metros
Diafragma	11		
Hiperfocal	1,57		Metros
Distancia cercana y lejana	0,57	2,09	Metros
Fotobase	3,330		Milímetros
Tamaño píxel objeto	0,260		Milímetros
Tamaño sensor objeto	1,110	0,740	Metros
Relación Base/Alejamiento	1 / 5,4		
Error altimétrico	0,0010		Metros
Error planimétrico	0,0003		Metros
Recubrimiento total	0,944	0,370	Metros
Distancia avance	0,167		Metros
Separación pasadas	0,370		Metros
Dimensiones del objeto	1,65	1,15	Metros
Número de pasadas	1		Pasadas
Número de fotos/pasada	4		Fotos
Denominador de Escala	50		Adimensional
Recubrimiento Longitudinal	85		Porcentaje
Recubrimiento Transversal	50		Porcentaje

Figura 9. Proyecto de vuelo cámara secundaria

#### 3.1.4 Guía epipolar

La guía epipolar consiste en una esquinera metálica con marcas que usaremos como carril sobre el que se desliza un carro de madera donde montaremos la cámara. Esta guía fue ideada y creada por los profesores José Luis Valbuena Durán y Julián Aguirre de Mata.

El carro estará formado por un tablón de aglomerado con dos pares de ruedas en su parte inferior para el deslizamiento de este por la guía metálica. Adicionalmente cuenta con una quinta rueda para mantener el soporte nivelado.

Para una colocación y detención precisa del carro en las posiciones establecidas previamente, se añadió un sistema pivotante a base de muelles en el que una varilla metálica queda encajada en las muescas que dispone la guía, separadas 85 mm entre ellas. De esta manera nos aseguraremos que realizaremos las fotografías desde la misma posición en cada pasada.

A su vez la guía metálica irá adherida sobre un tablón de madera, dotado de tres patas para evitar el balanceo de éste.

Esta construcción la utilizaremos para montar la cámara secundaria al realizar las medidas del panel de test.

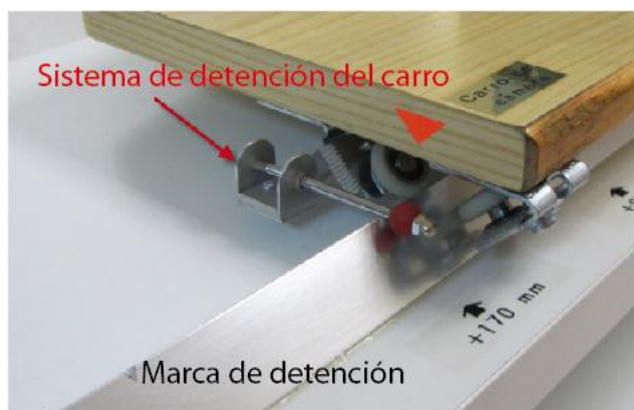


Figura 10. Fotografía en detalle de la marca del sistema de detención del carro

#### 3.1.5 Barra de escala

Al crear nuestro sistema local de coordenadas, se necesita escalarlo, por lo cual se hicieron mediciones a los extremos de una barra de escala calibrada Leica. La medida exacta de la barra calibrada proporcionada por el fabricante es de 899, 867 mm.



Figura 11. Barra de Escala Leica

### 3.2 OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Para la obtención de las imágenes destinadas a la restitución fotogramétrica se han usado dos cámaras no métricas cuya calibración vamos a calcular previamente. Haremos varias fotografías en cada pasada para poder tener pares estereoscópicos.

Los pares estereoscópicos son pares de imágenes de la zona a estudiar, parcialmente solapados y tomados desde puntos de vista diferentes con los que podremos hacer la restitución fotogramétrica. Para hacer la restitución necesitaremos una serie de puntos de apoyo de coordenadas conocidas, en nuestro caso estos puntos de apoyo serán varios:

- Los 54 puntos situados en el panel de test que aparecerán en las imágenes tomadas por la cámara primaria.
- Cinco marcas de la cámara primaria que fotografiaremos con la cámara secundaria.
- Siete puntos de apoyo colocados sobre una estructura que aparecerán en las imágenes tomadas por la cámara secundaria.



Figura 12. Puntos de apoyo alrededor cámara

### 3.2.1 Imágenes de la cámara primaria

Con la cámara primaria realizaremos una pasada formada por tres imágenes, separadas entre sí 17 cm y con un recubrimiento entre ellas del 80 %.

A la hora de realizar las tomas, la cámara ira montada sobre un trípode dotado de una plomada para su mejor colocación en cada una de las tres posiciones.

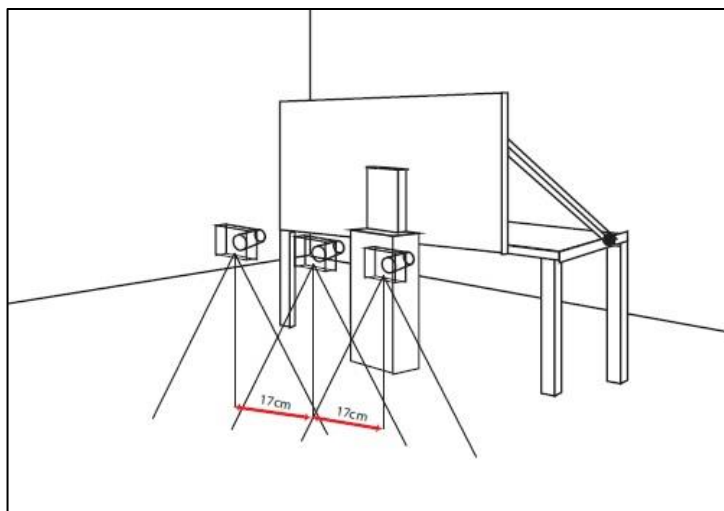


Figura 13. Tomas fotográficas cámara primaria

### 3.2.2 Imágenes de la cámara secundaria

La cámara secundaria estará montada sobre la guía epipolar (con tres posiciones separadas también 17 cm) y hará fotos de la cámara primaria. Realizaremos tres pasadas con tres imágenes en cada una de las pasadas. De esta manera por cada foto en cada una de las tres posiciones de la cámara primaria, la cámara secundaria hará a su vez tres fotos (tendremos en total tres fotos con la cámara primaria y nueve fotos con la cámara secundaria).

## 3.3 MEDIDA DEL PANEL DE CALIBRACIÓN

### 3.3.1 Preparación de la calibración

Lo primero que haremos será montar la estructura sobre la que ira anclado el panel de calibración.

El panel de calibración que vamos a utilizar tiene 150x100 cruces y unas dimensiones de 1200x800 mm. En la primera toma de datos realizada pegaremos el panel de calibración a un tablero de madera de sus mismas dimensiones que ira atornillado a una mesa de dibujo. El tablero de la mesa de dibujo lo colocaremos de forma vertical. Como la estructura no es muy estable, ya que el tablero de la mesa se caía paulatinamente y la medición al completo no valdría, calzamos la mesa con unas escuadras de madera para conseguir que el sistema quedara fijo totalmente.



Figura 14. Sujeción panel de calibración

En cambio, en la segunda toma de datos el tablero de madera al que está adherido el panel irá provisto de unas escuadras de madera que garantizarán su verticalidad. Este tablero lo colocaremos de forma vertical sobre una mesa de unos dos metros de largo, provista de una esquinera metálica con marcas que serán las distintas posiciones que tomará el panel durante la calibración.



Figura 15. Sujeción panel de calibración en la toma 2

Las marcas de la esquinera estarán a distintas distancias dependiendo de las requeridas en cada una de las calibraciones:

- Las posiciones para la calibración de la cámara primaria serán: 44, 50,57, 64, 70,118 y 166 cm (las dos últimas sólo las empleamos en la primera toma de datos). El enfoque de la cámara será a 70 cm, que será una de las posiciones de la calibración. Las otras posiciones se encuentran entre el enfoque cercano (44 cm) y el enfoque lejano (166 cm) de la cámara. El enfoque cercano y el enfoque lejano son las distancias objeto que producen una imagen enfocada sin acomodación.

- Las posiciones para la calibración de la cámara secundaria serán: 57, 64, 75, 82, 90 y 170 cm (170 cm sólo estará incluida en la primera toma de datos). El enfoque de esta cámara será a 90 cm. Las otras posiciones se encuentran entre el enfoque cercano (57 cm) y el enfoque lejano (más de dos metros) de la cámara.

A continuación prepararemos el sistema de medición:

- Realizaremos la toma de datos en el laboratorio de aplicaciones industriales ya que el espacio idóneo. Elegimos el laboratorio para poder realizar nuestras mediciones ya que debemos evitar calentamientos desiguales del trípode por sol u otra fuente de calor, posicionamientos sobre salidas de aire, vibraciones en el suelo por paso de maquinaria, corrientes de aire y grietas en el suelo que indiquen condiciones inestables.
- La cámara primaria estará provista de cinco marcas (cuatro tornillos con conos en una estructura adherida a la cámara y un quinto punto en la segunda toma de datos que será una diana pegada al trípode) que mediremos y dotaremos de coordenadas.



Figura 16. Tornillos de la cámara primaria

- Las estaciones topográficas deberán estar posicionadas de modo que puedan observar todos los puntos del sistema: los puntos del panel de calibración en cada una de sus posiciones, las marcas de la cámara primaria y los puntos de apoyo (tanto el test como los de la estructura auxiliar en el caso de la primera toma de datos).
- El panel de calibración deberá permanecer estable durante toda la toma de datos para garantizar que las coordenadas no varíen.
- En la primera toma la mesa sobre la que va montada la guía epipolar la colocaremos a una distancia que permita que la cámara, montada ya en la guía, esté a una distancia de 17 cm del panel de calibración medida desde el objetivo.



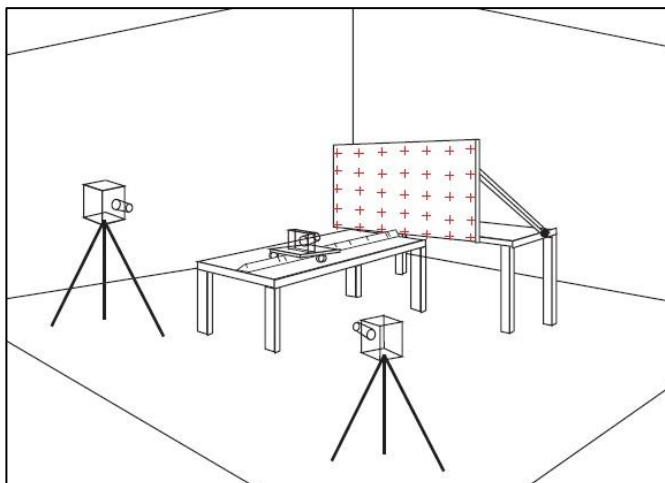


Figura 17. Colocación sistema calibrado primera toma

- En la segunda toma colocaremos el panel sobre una de las marcas del carril de la mesa y mediremos la distancia indicada en la marca, de manera que el panel esté separado de la cámara dicha distancia.

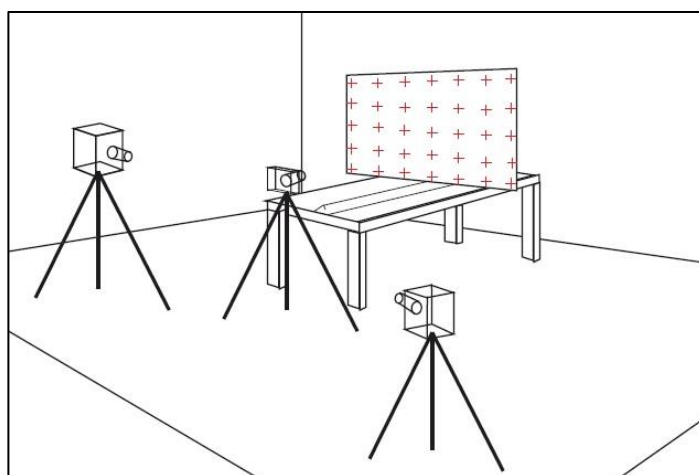


Figura 18. Colocación sistema calibrado segunda toma

### 3.3.2 Red Topográfica

Establecemos una red topográfica que nos permitirá determinar el sistema de referencia que usaremos para la medición.

Para materializar la red topográfica realizaremos una serie de medidas angulares con visuales recíprocas y simultáneas entre ambos aparatos y mediremos tanto una serie de dianas repartidas por el laboratorio como las dianas de una barra calibrada (con una distancia entre sus puntos de 899.867 mm y con exactitud del orden de 0.01 mm) para dotar de escala a nuestra red.

Con estas medidas angulares lo que conseguiremos será dotar de coordenadas locales tridimensionales a las estaciones.

El origen del sistema de coordenadas lo estableceremos durante la toma de datos en una de las estaciones que posteriormente se trasladará a la esquina inferior izquierda del panel de calibración para mayor comodidad a la hora de realizar el proceso fotogramétrico.

Para realizar las medidas angulares, aparte de las dos estaciones totales usaremos el software Leica XYZ.

### 3.3.3 Leica XYZ

Este programa lo utilizaremos para todas las medidas topográficas que hagamos durante todo el proceso. Para orientar las estaciones y obtener sus coordenadas este programa determina la posición de los dos aparatos realizando un ajuste por mínimos cuadrados con las medidas referidas a las dianas y la barra de escala.

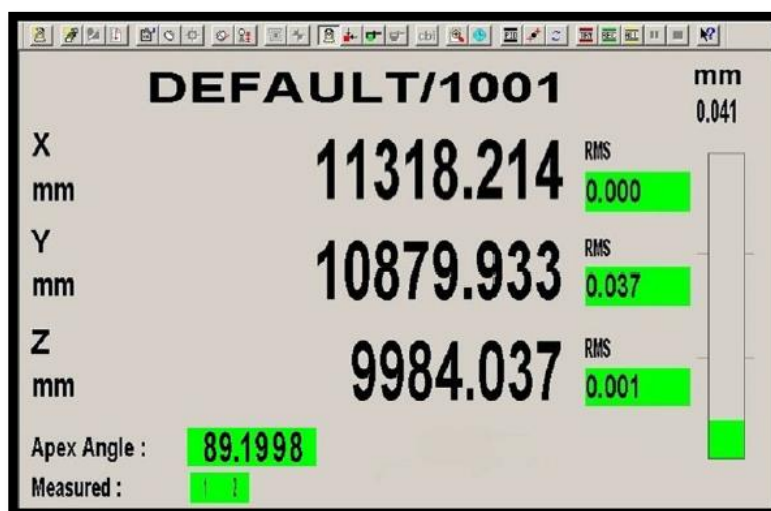


Figura 19. Interfaz Leica Axyz durante la medición topográfica

- Coordenadas planimétricas:

En ocasiones se presenta la necesidad de levantar dos puntos desconocidos P1 y P2 visando desde ellos a otros dos conocidos A y B que por su naturaleza no sean estacionables. En nuestro caso los puntos desconocidos serán las estaciones y los puntos conocidos los extremos de la barra de escala.

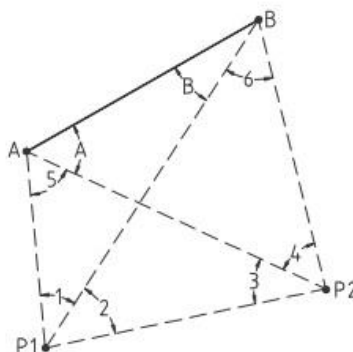


Figura 20. Esquema de las estaciones y la barra de escala en campo



Este método recibe el nombre de problema de Hansen, también llamado de reducción o ampliación de bases. Las observaciones se realizan desde los puntos desconocidos, teniendo entonces los valores de los ángulos 1, 2, 3 y 4. Los ángulos que corresponden a 5 y 6 se pueden obtener por diferencia a  $180^\circ$  en los triángulos  $AP_1P_2$  y  $BP_1P_2$ . Los ángulos A y B son desconocidos pero al tener el valor del resto de los ángulos de la figura podremos calcularlos.

Resuelta la figura al conocer todos los ángulos que la forman, el cálculo de coordenadas queda reducido a determinar el acimut y la distancia desde el punto conocido.

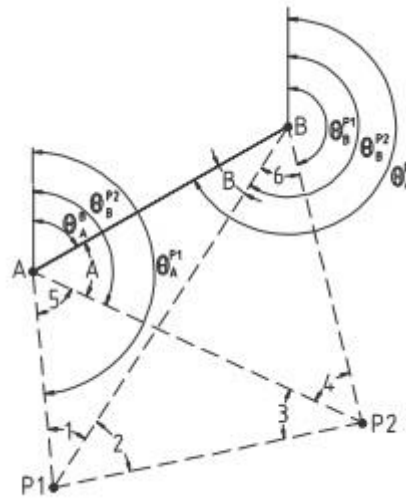


Figura 21. Acimuts y ángulos en el problema de Hansen

$$\begin{aligned} X_{P_1} &= X_A + \overline{AP_1} \sin \theta_A^{P_1} \\ Y_{P_1} &= Y_A + \overline{AP_1} \cos \theta_A^{P_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{P_2} &= X_B + \overline{BP_2} \sin \theta_B^{P_2} \\ Y_{P_2} &= Y_B + \overline{BP_2} \cos \theta_B^{P_2} \end{aligned}$$

- Coordenadas altimétricas:

Una vez que tenemos resueltas las coordenadas planimétricas obtenemos las distancias. Con las distancias y las visuales cenitales podremos obtener la coordenada Z de las estaciones.

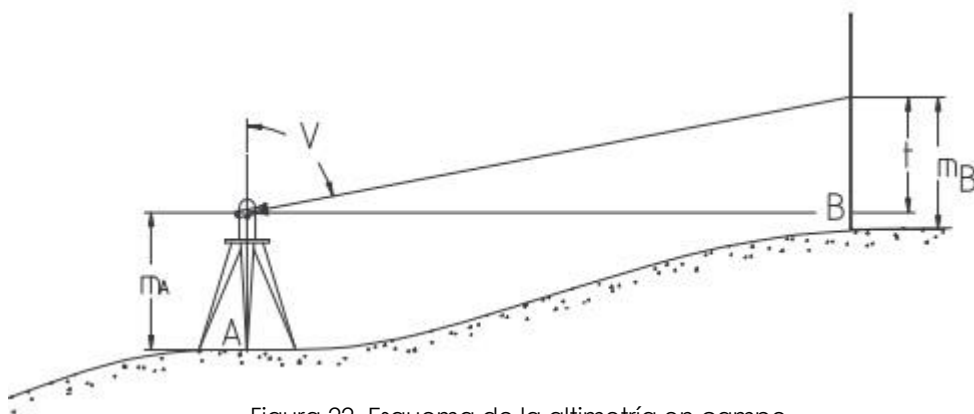


Figura 22. Esquema de la altimetría en campo



$$\Delta H_A^B = H_B - H_A$$
$$H_B = H_A + \Delta H_A^B = H_A + \frac{Dist}{\tan V}$$

Después, estas coordenadas aproximadas altimétricas, junto con las planimétricas se utilizarán para, con el resto de observaciones, hacer un ajuste por Mínimos Cuadrados de toda la red y obtener así las coordenadas finales de las bases con sus precisiones.

Las precisiones de las coordenadas deberán estar por debajo de 0,080 mm si no tendremos que desechar alguna observación y volver a hacer el ajuste.

### 3.3.4 Observación topográfica del panel

Una vez que hemos obtenido las coordenadas de las estaciones podemos empezar la calibración.

Comenzamos midiendo las coordenadas de las 35 marcas recuadradas del panel de calibración (estando dispuestas estas marcas en 7 columnas y 5 filas). Dichas coordenadas deberán tener una precisión por debajo de las 80 micras.

La medición será realizada en el siguiente orden (de izquierda a derecha y de arriba abajo, iremos fila por fila):

#### Toma 1

- Primera fila 001\_1, 001\_2, 001\_3, 001\_4, 001\_5, 001\_6, 001\_7
- Segunda fila 025\_1, 025\_2, 025\_3, 025\_4, 025\_5, 025\_6, 025\_7
- Tercera fila 050\_1, 050\_2, 050\_3, 050\_4, 050\_5, 050\_6, 050\_7
- Cuarta fila 075\_1, 075\_2, 075\_3, 075\_4, 075\_5, 075\_6, 075\_7
- Quinta fila 100\_1, 100\_2, 100\_3, 100\_4, 100\_5, 100\_6, 100\_7

#### Toma 2

- Primera fila 001\_001, 001\_025, 001\_050, 001\_075, 001\_100, 001\_125, 001\_150
- Segunda fila 025\_001, 025\_025, 025\_050, 025\_075, 025\_100, 025\_125, 025\_150
- Tercera fila 050\_001, 050\_025, 050\_050, 050\_075, 050\_100, 050\_125, 050\_150
- Cuarta fila 075\_001, 075\_025, 075\_050, 075\_075, 075\_100, 075\_125, 075\_150
- Quinta fila 099\_001, 099\_025, 099\_050, 099\_075, 099\_100, 099\_125, 099\_150 (esta fila será la superior a la última fila recuadrada)



Al medir las coordenadas del panel podremos ya trasladar el sistema de referencia al propio panel como se ha dicho anteriormente. El eje **x** será la quinta fila, el eje **y** la primera columna y el eje **z** será la profundidad(al determinar los ejes **x** e **y** ya nos sale ortogonal a ambos). El origen del sistema lo determinaremos como (10000, 10000, 10000) para evitar que haya coordenadas negativas.

Una vez que el panel de calibración esté completamente medido comenzaremos a calibrar las cámaras.

### 3.4 MEDIDA DEL PANEL DE TEST

Para poder conseguir los parámetros de orientación externa necesitaremos apoyarnos en otro sistema de coordenadas. Como en este sistema también mediremos topográficamente las coordenadas de los puntos de las cámaras podremos obtener los siete parámetros de una transformación tridimensional de semejanza (Tres giros:  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ; Tres traslaciones:  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  y un factor de escala  $\lambda$ ) y con estos parámetros podremos obtener las coordenadas del centro de proyección y los giros del eje óptico de la cámara.

Este nuevo sistema de coordenadas lo conseguiremos apoyándonos topográficamente en un panel de test de 54 puntos dotados de precisión suficiente para que podamos utilizarlo.

#### 3.4.1 Preparación del sistema

En la medición del panel de test tendremos cuatro elementos fundamentales:

- El panel de test, apoyado sobre un cajón de madera de forma que este estable durante toda la medición y no sufra movimiento alguno. Este panel estará provisto de 54 puntos situados a distintas posiciones y profundidades.
- La cámara primaria, montada sobre un trípode a una distancia del panel de test de 70 cm.
- La cámara secundaria, estará a una distancia de la cámara primaria de 90 cm e irá montada sobre la guía epipolar y ésta, a su vez, la apoyaremos sobre una mesa. La guía epipolar utilizada en esta parte de las mediciones tiene siete marcas separadas entre sí 8,5 cm, aunque sólo utilizaremos la marca central y las marcas situadas a -17 cm y 17 cm. Elegimos estas marcas porque la focal nominal elegida es 17 cm también y así nos aseguramos que la amplitud de campo es suficiente y podemos realizar sólo tres fotografías.
- Las estaciones topográficas, situadas detrás de la cámara secundaria de tal forma que puedan observar tanto el panel de test como las marcas de la cámara primaria.

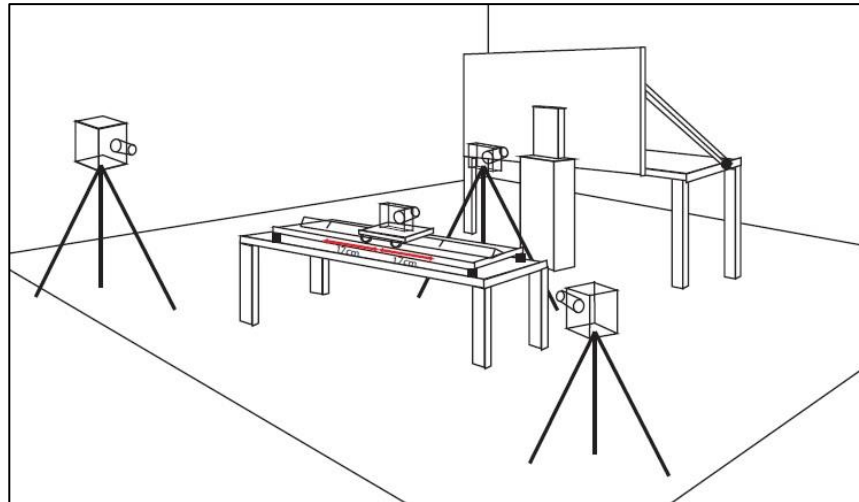


Figura 23. Colocación sistema test primera toma

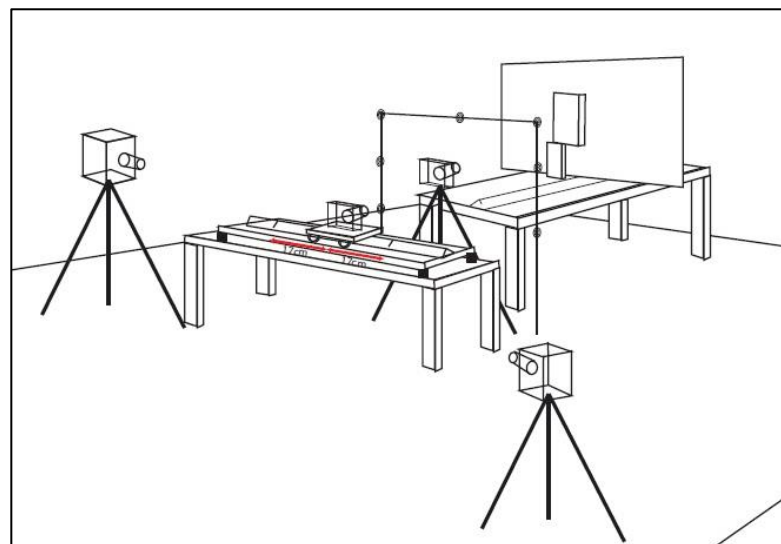


Figura 24. Colocación sistema test segunda toma

### 3.4.2 Observación topográfica del test

Orientaremos las estaciones de la misma manera que lo hemos hecho en las medidas del panel de calibración y una vez que las estaciones estén totalmente orientadas comenzamos a medir los 54 puntos del panel de test.

La medición será realizada en el siguiente orden (de izquierda a derecha y de arriba abajo, iremos fila por fila):

- Primera fila test/101, test/102, test/103, test/104, test/105, test/106, test/107, test/108
- Segunda fila test/109
- Tercera fila test/110, test/111, test/112, test/113, test/114, test/115
- Cuarta fila test/116, test/117, test/118, test/119, test/120, test/121
- Quinta fila test/122, test/123, test/124, test/125, test/126, test/127, test/128, test/129

- Sexta fila test/130, test/131, test/132, test/133, test/134, test/135
- Séptima fila test/136, test/137, test/138, test/139, test/140, test/141
- Octava fila test/142, test/143, test/144, test/145, test/146, test/147, test/148, test/149, test/150
- test/151(T1), test/152(T2), test/153(T3), test/154(T4)

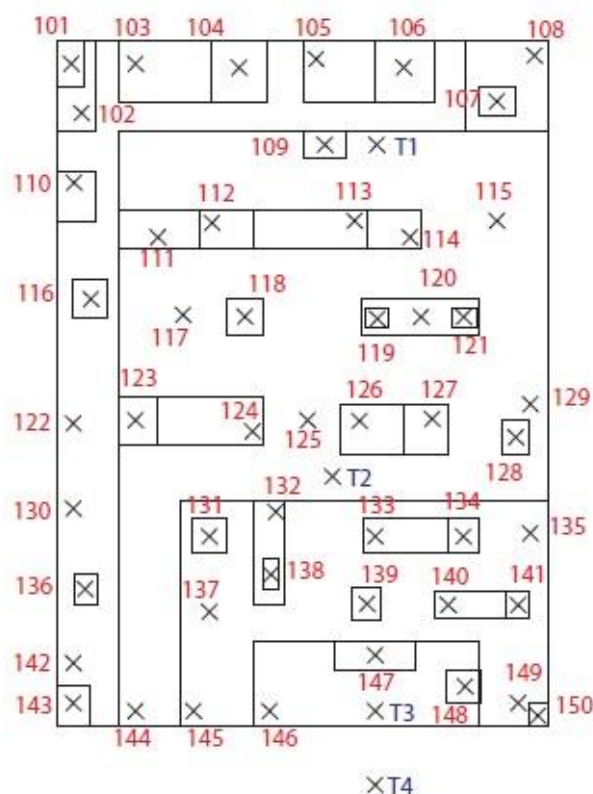


Figura 25. Situación de los puntos del panel de test

### 3.4.3 Tomas de la cámara

Cuando terminemos de medir el test empezaremos a realizar las medidas de las cámaras y a tomar fotografías. Como explicamos anteriormente la cámara primaria realizará tres fotografías mientras que la cámara secundaria tomará tres fotografías por cada una de las realizadas por la primaria. Durante las tomas mediremos los tornillos de la cámara primaria y las dianas del arco auxiliar situado alrededor del sistema que nos servirá de apoyo para las orientaciones de la cámara secundaria.

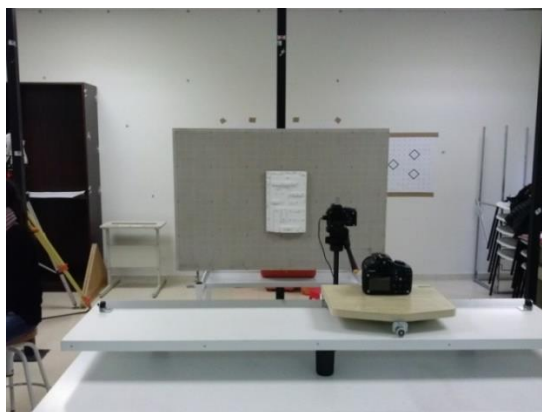


Figura 26. Fotografía posterior de la posición del sistema test en la primera toma



Figura 27. Fotografía posterior de la posición del sistema test en la segunda toma

### 3.5 Orientación interna. Calibración

#### 3.5.1 Introducción

En fotogrametría siempre que utilicemos una cámara convencional será necesario obtener la calibración de dicha cámara. Calibrar una cámara significa encontrar sus parámetros internos, externos y distorsiones que ésta tenga.

Los parámetros internos son aquéllos que definen la geometría interna y la óptica de la cámara, y tales parámetros son la distancia focal, posición del punto principal y la distorsión radial y tangencial de las lentes. Estos parámetros son constantes en tanto no varíen las características y posiciones relativas entre la óptica y el sensor imagen.

- Distancia focal:

A priori tenemos la distancia focal nominal, la cual se mide a lo largo del eje del objetivo y es la distancia entre el centro óptico de la cámara y el plano del sensor (será aportada por el fabricante). La distancia focal que obtenemos tras el proceso de calibración es la distancia focal calibrada que es la distancia focal producida en conjunto de la distribución media o minimización de la distorsión radial de las lentes.



- Posición del punto principal:

El punto principal queda definido matemáticamente como la intersección del plano imagen con el eje principal perpendicular al mismo, también llamado plano focal. A partir de este punto del plano focal se trazan las distorsiones de forma simétrica.

- Distorsión:

La distorsión es la imposibilidad de la lente de dar la imagen de un punto en la posición correcta. Es la aberración más importante, ya que posee un carácter métrico y es la que más afecta a la fotogrametría. Se producen dos distorsiones: distorsión radial y distorsión tangencial.

- Distorsión radial

Es un tipo de aberración que origina que las líneas rectas aparezcan como curvas en la fotografía, debido a la desalineación que sufren los rayos al atravesar las distintas lentes. Si las curvas son cóncavas con respecto al centro de la fotografía, la distorsión radial se denomina distorsión de barril, mientras que si son convexas se llama distorsión de corsé.

- Distorsión tangencial:

Es la debida a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes que produce un descentramiento de los centro de curvatura con respecto al eje óptico. Esta distorsión provoca un descentramiento que tiene componente radial y tangencial, siendo esta última perpendicular al vector de posición del punto en cuestión. En las lentes modernas el efecto de la distorsión tangencial es pequeño comparado con el de la distorsión radial por lo que podría ignorarlo.

En este proyecto vamos a realizar la calibración usando el módulo Calibra de AeroTri de Digi3D. El conocimiento de las fórmulas que se muestran a continuación no es necesario para aplicar los parámetros calculados, ya que el programa desarrolla los polinomios y agrupa términos, y muestra cada componente de la función de distorsión como un único polinomio.

Los polinomios se muestran en función de la variable  $s$ , que es el radio normalizado dividido por su máximo valor posible, es decir, la semidigonal. El fichero de salida lo indica explícitamente. En otros programas los polinomios son distintos a los utilizados por Calibra.



## Modelos polinómicos

Cada modelo polinómico consta de dos series de polinomios. La primera de ellas o serie  $p$  son las componentes de la distorsión simétrica, ya sea la radial o la tangencial, pues la fórmula es la misma para ambas. Se aplica también a ciertas componentes asimétricas: las *pares*. La segunda serie, serie  $q$ , se aplica a las componentes *impares* de la distorsión asimétrica.

### ○ Impar

#### ■ Serie $p$ :

$$s \quad 2s^3 - s \quad 4,8s^5 - 4,7s^3 + 0,9s \quad 12,8s^7 - 19,1s^5 + 8,2s^3 - 0,9s \\ 38,4s^9 - 76,2s^7 + 50,5s^5 - 12,6s^3 + 0,9s$$

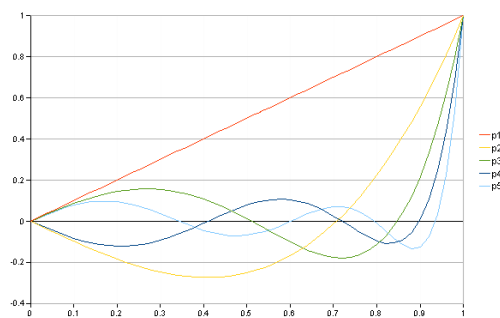


Figura 28. Gráfico de la serie  $p$  del modelo polinómico impar

#### ■ Serie $q$ :

$$s^2 \quad 2,5s^4 - 1,5s^2 \quad 6,4s^6 - 7,2s^4 + 1,8s^2$$

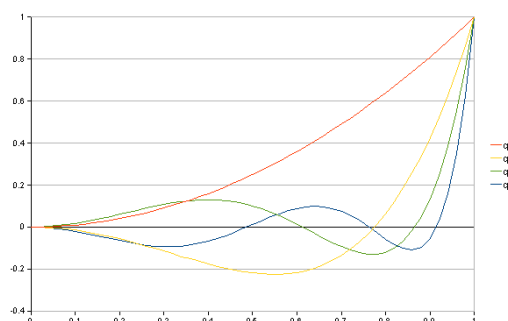


Figura 29. Gráfico de la serie  $q$  del modelo polinómico impar



○ Completo

▪ Serie p:

$$s \quad 3s^2 - 2s \quad 9s^3 - 11,4s^2 + 3,4s \quad 29,2s^4 - 53,1s^3 + 30,1s^2 - 5,2s \\ 95,8s^5 - 225,4s^4 + 187,1s^3 - 63,9s^2 + 7,4s$$

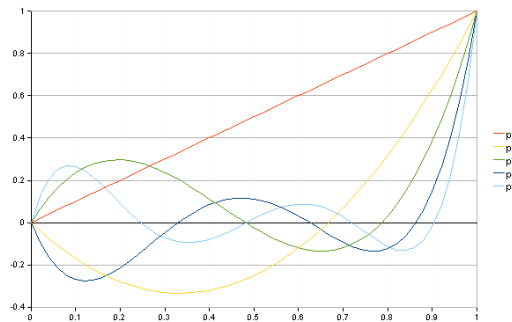


Figura 30. Gráfico de la serie p del modelo polinómico completo

▪ Serie q:

$$s^2 \quad 4s^3 - 3s^2 \quad 14,5s^4 - 20,3s^3 + 6,8s^2$$

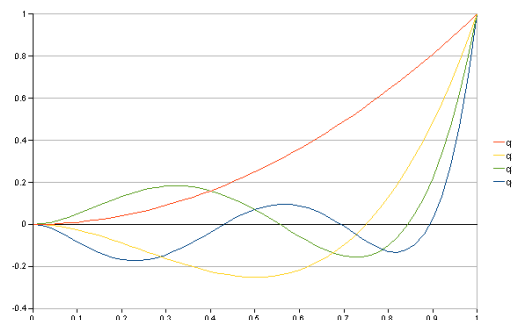


Figura 31. Gráfico de la serie q del modelo polinómico completo

### Modelos asimétricos

Cada componente asimétrica es el producto de un polinomio, que depende de  $s$  (es decir, del radio), por una componente que solamente depende del ángulo  $\theta$ . Los polinomios se toman del modelo polinómico seleccionado mientras que las componentes que dependen de  $\theta$  las determina el modelo asimétrico. Las gráficas son muy parecidas para los modelos completo e impar.

○ Radial/tangencial

En este modelo cada componente asimétrica tiene una dirección constante (tomando como referencia los radios) y va variando de módulo de manera periódica en función de  $\theta$ . En la primera serie la dirección es la radial mientras que en la segunda es la tangencial.

A continuación se muestran las primeras componentes para el modelo polinómico completo. Para el modelo impar no hay más que sustituir los polinomios que aquí se muestran por los de ese modelo.

▪ Serie 1:

$$c_1 s^2 \cos \theta + c_2 s^2 \sin \theta + c_3(4s^3 - 3s^2) \cos \theta + c_4(4s^3 - 3s^2) \sin \theta + c_5 s \cos 2\theta + c_6 s \sin 2\theta$$

La serie 2 es igual que la 1 diferenciándose en la dirección de las componentes, que en aquélla es tangencial y en ésta, radial.

○ Vector giratorio

En este modelo cada componente asimétrica tiene un módulo fijo unidad y “va dando vueltas” según se varía  $\theta$ . En la primera serie los vectores dan vueltas en el sentido contrario al crecimiento de  $\theta$ , es decir, en sentido horario. En la segunda el sentido de giro es el opuesto. Dentro de cada serie, el papel que en el modelo anterior jugaban los pares sen/cos lo desempeñan aquí pares de vectores ortogonales u/v. Los vectores u son componentes que para  $\theta=0$  siguen la dirección radial, mientras que los vectores v siguen la dirección tangencial para esos mismos puntos.

Lo dicho en el párrafo anterior se aplica a todas las componentes excepto las cuatro primeras, dos de la serie 1 y dos de la serie 2. Estas cuatro se sustituyen por las primeras del modelo radial/tangencial, ya que debido a ciertas consideraciones teóricas es necesario que las componentes  $c_1$  y  $c_2$  de la distorsión radial asimétrica aparezcan de manera explícita en cualquier modelo.

Al igual que antes se emplea para mostrar las componentes los polinomios del modelo completo.

$u_{c\theta}$  significa: Vector de módulo unidad que en un punto de la fotografía con coordenadas  $(r, \theta)$  forma un ángulo  $c\theta$  con la dirección radial.

$v_{c\theta}$  significa: Vector de módulo unidad que en un punto de la fotografía con coordenadas  $(r, \theta)$  forma un ángulo  $c\theta$  con la dirección tangencial.

▪ Serie 1:

$$c_1 s^2 \cos \theta + c_2 s^2 \sin \theta + c_3(4s^3 - 3s^2)u_{-\theta} + c_4(4s^3 - 3s^2)v_{-\theta} + c_5 s u_{-2\theta} + c_6 s v_{-2\theta}$$

▪ Serie 2:

$$d_1 s^2 \cos \theta + d_2 s^2 \sin \theta + d_3(4s^3 - 3s^2)u_{+\theta} + d_4(4s^3 - 3s^2)v_{+\theta} + d_5 s u_{+2\theta} + d_6 s v_{+2\theta}$$



Los parámetros externos de la cámara son aquellos que definen la posición y la orientación de la cámara, es decir, dan la orientación externa de la cámara. Los parámetros externos son un vector de traslación y una matriz de rotación:

- Vector de traslación:  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ . Este vector está definido en el espacio describiendo las posiciones relativas de los orígenes de los dos marcos de referencia, el calibrado y el test. Los parámetros que definen la traslación describen la posición de la cámara respecto al sistema test.
- Matriz de rotación  $R$ : ángulos  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ . Cuyo efecto es traer los ejes correspondientes de los dos marcos uno sobre el otro, con la condición de ser una matriz ortogonal  $R'R=RR'=I$ . Los parámetros de la rotación describen la orientación adquirida por la cámara respecto al sistema test.

Para la calibración con Digi3D necesitaremos una plantilla para realizar la calibración. Esta plantilla estará formada por una malla de dianas a las que dotaremos de coordenadas tridimensionales con las que posteriormente ajustaremos el bloque.

Para poder hacer la calibración con Digi3D primero tendremos que realizar una serie de mediciones en laboratorio:

- Con una estación total y un teodolito electrónico mediremos tanto las marcas que colocaremos en la cámara primaria como las cruces del panel de calibración.
- Realizaremos fotografías con ambas cámaras a distintas profundidades dependiendo de la distancia de enfoque empleada en las tomas de cada una.

Comenzaremos calibrando la cámara secundaria. Para ello enfocamos la cámara a una distancia de 90 cm y bloqueamos el autoenfoco puesto que todas las tomas de la calibración de la cámara secundaria se harán con dicho enfoque. Para evitar movimiento del objetivo lo fijaremos con una cinta adhesiva.

En la primera toma de datos montamos la cámara sobre el carro y lo colocamos en la guía epipolar sobre la primera marca (57 cm) y realizamos una fotografía.

En la segunda medición la cámara la montamos sobre el trípode y colocamos el panel sobre la marca de 90 cm. Las fotografías se harán con el temporizador de diez segundos para que se estabilice la cámara. Repetiremos el proceso en todas las posiciones determinadas (57, 64, 75, 82 y 170 cm) y podremos comenzar a calibrar la cámara primaria.

Las fotografías realizadas serán las siguientes:

Toma 1

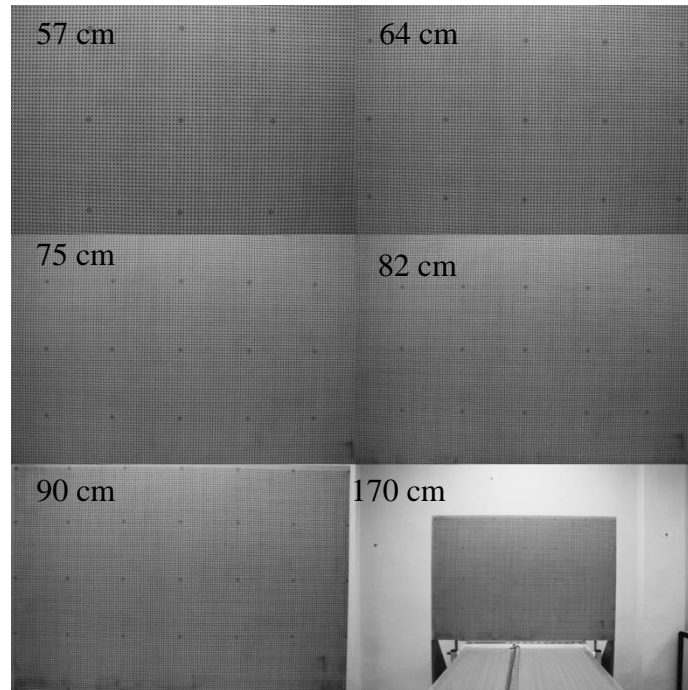


Figura 32. Fotogramas de la calibración de la cámara secundaria en la primera toma

Toma 2

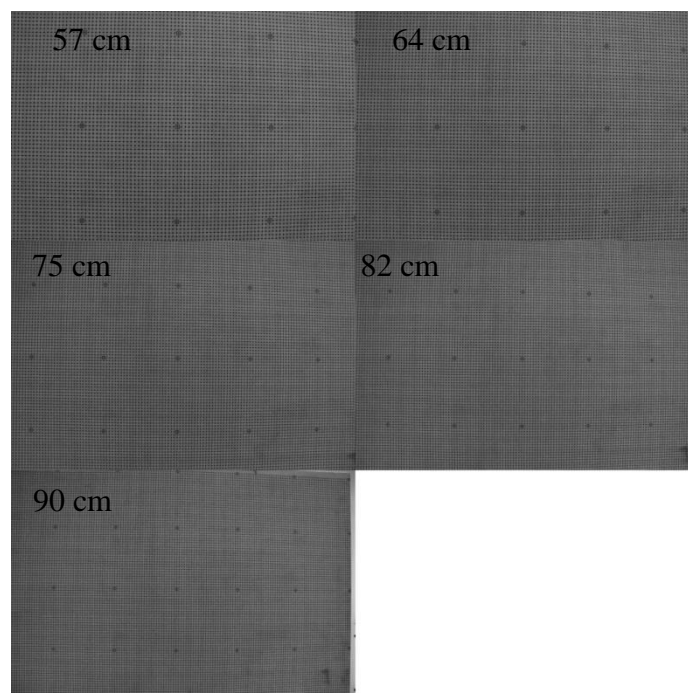


Figura 33. Fotogramas de la calibración de la cámara secundaria en la segunda toma

Para la cámara primaria las fotografías las realizaremos a una distancia de 70 cm por lo que enfocamos la cámara a esa distancia y dejamos fijo el autoenfoque.

Mediremos topográficamente los conos de la cámara primaria, colocaremos el panel en las marcas 44, 50, 57, 64, 70, 118 y 166 cm y tomamos fotografías en cada una de ellas. Las fotografías las realizaremos conectando la cámara a un ordenador, tomándolas con un software de Olympus (Olympus Studio 2).

#### Toma 1

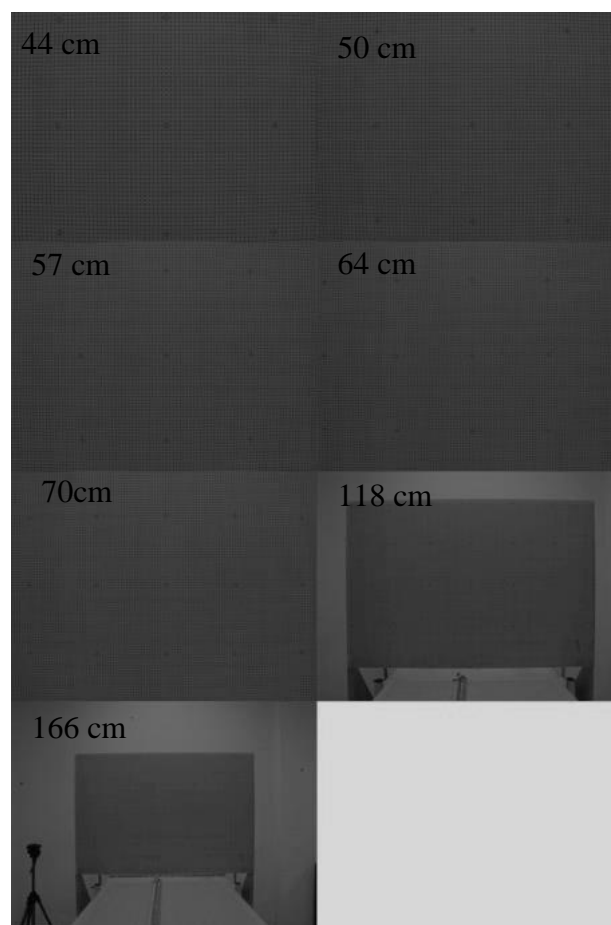


Figura 34. Fotogramas de la calibración de la cámara primaria en la primera toma

## Toma 2

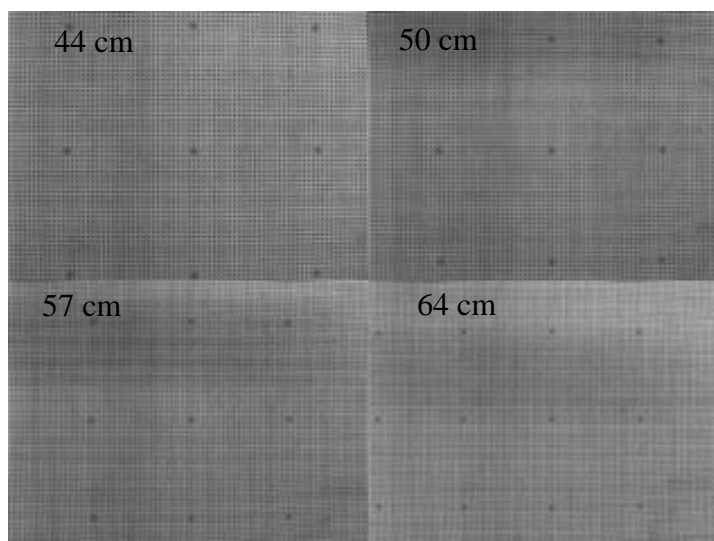


Figura 35. Fotogramas de la calibración de la cámara primaria en la segunda toma

Lo que hemos hecho durante la observación del panel de calibración en el laboratorio es en primer momento dejar fijo el panel mientras movemos la cámara por el carril mientras que en la segunda toma lo hacemos a la inversa; dejamos fija la cámara mientras lo que se mueve es el panel.

### 1. Panel fijo

Debemos desplazar el panel a cada marca con una transformación tridimensional de semejanza. Para poder hacer dicha transformación debemos conseguir las coordenadas imagen y las coordenadas terreno de los puntos del panel de calibración. Las coordenadas Imagen las obtendremos por correlación. Ponemos las imágenes en blanco y negro y creamos un patrón artificialmente en Photoshop para buscar las cruces al hacer la correlación. Deberemos coger la cruz central de cada imagen para poder hacer un patrón de cada una de las profundidades, ya que al variar la profundidad a la que se han hecho las fotos también variará el patrón. Este patrón estará formado por una matriz cuadrada de dimensión impar con centro la cruz.

Nuestro patrón lanza una malla de puntos a la imagen y busca líneas enteras de cruces de cuadrados enteros. Deberemos indicarle cuál es la primera marca del panel (la situada en la esquina superior izquierda) y la distancia entre cruces consecutivas. Obtenemos un fichero con las coordenadas píxel de las cruces y otro con el error de las coordenadas que no se han podido correlar, en nuestro caso aplicaremos un coeficiente de correlación de 0,9. Podría salir un error en las coordenadas de las filas o columnas de los extremos, ya que es donde se produce mayor distorsión y no salen los cuadrados del patrón enteros.



Tras realizar la correlación tendremos un fichero con todas las coordenadas píxel, ahora necesitamos un fichero con todas las coordenadas terreno.

Para obtener las coordenadas terreno deberemos hacer una interpolación de las cruces del panel de calibración, ya que a priori sólo hemos observado topográficamente 35 marcas y el panel está formado por 150x100 cruces.

Hacemos una transformación polinómica de cuarto grado para obtener las coordenadas terreno de las 15000 cruces del panel. Partimos de la primera marca asignándole un valor de 4 mm.

A continuación con una transformación tridimensional de semejanza llevaremos el panel de calibración a cada una de las marcas para, de esta forma, conseguir que se quede fija la cámara y se mueva el panel. Fijaremos la primera marca del carril (44) y haremos cuatro transformaciones (50-44, 57-44, 64-44, 70-44).

Una transformación tridimensional de semejanza es aquella que no varía la verdadera forma del objeto después de realizar la transformación. Partiendo de los sistemas de la figura siguiente, se quiere transformar las coordenadas de puntos del sistema  $(x, y, z)$  al sistema  $(X, Y, Z)$ . Como puede observarse en esta figura, los dos sistemas de coordenadas no son paralelos necesitando la transformación, el uso de siete parámetros de transformación independientes:

- tres rotaciones ( $\Omega, \Phi, K$ )
- un factor de escala ( $\lambda$ )
- tres traslaciones ( $T_x, T_y, T_z$ )

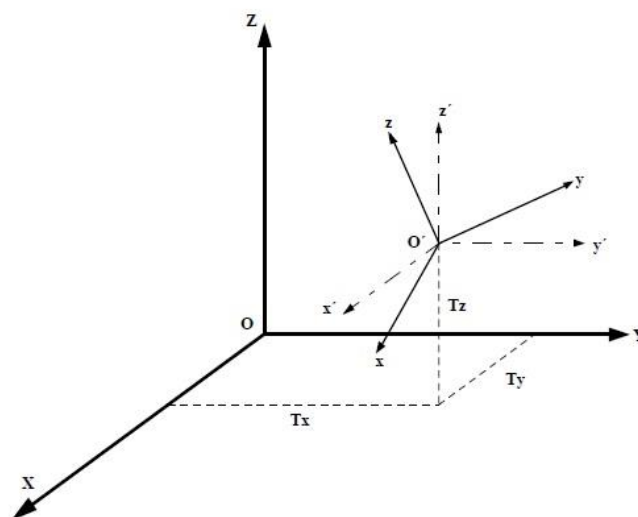


Figura 36. Esquema sistemas de coordenadas de origen y destino de una T3DS

Considerando el caso más general, ejes girados, trasladados y con diferentes unidades de medida, la expresión final resultante sería:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$



Los elementos de la matriz de rotación  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33}$  no son lineales, es decir, vienen expresados en función del seno y coseno de los ángulos de rotación. Sin embargo para poder utilizar esta ecuación deberíamos linealizarla.

Hay muchas formas de representar rotaciones y la más usada en fotogrametría es mediante matrices ortonormales como acabamos de ver. Una matriz ortonormal es una matriz ortogonal (matriz cuadrada cuya matriz inversa coincide con su matriz traspuesta) que además cumple que su norma es la unidad, es decir, el módulo de cada vector que la forma es 1.

En este proyecto en vez de matrices ortonormales vamos a utilizar cuaterniones unitarios debido a las ventajas que presentan frente a las matrices:

- Comparados con las matrices de rotación, son más eficientes y más estables numéricamente.
- No hace falta linealizar las ecuaciones.
- No requiere iteraciones.
- No todas las matrices poseen un inverso multiplicativo mientras que todos los cuaterniones diferentes de cero si son invertibles.
- Proporciona el resultado en un solo paso con la mejor transformación posible dadas las mediciones de los puntos en los dos sistemas de coordenadas.
- Es mucho más sencillo hacer cumplir la restricción de que un cuaternión tiene magnitud unitaria de lo que es para asegurar que una matriz es ortonormal.
- En el lenguaje de programación es más laborioso compilar matrices de rotación que cuaterniones.

Aunque tienen muchas ventajas respecto a las matrices de rotación los cuaterniones también presentan algunos inconvenientes:

- Con el ajuste del cálculo hecho con matrices de rotación obtenemos redundancia mientras que con los cuaterniones no.
- En fotogrametría las transformaciones tridimensionales de semejanza se suelen hacer con matrices de rotación por lo que tanto el uso como la existencia de cuaterniones es desconocida.

Los cuaterniones o números cuaternios son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos. Mientras que los números complejos son una extensión de los reales por la adición de la unidad imaginaria  $i$  los cuaterniones son una extensión generada de manera análoga añadiendo las unidades imaginarias:  $i, j$ , y  $k$  a los números reales.





Un cuaternión puede ser pensado como un vector con cuatro componentes, como un compuesto de un escalar y un vector ordinario o como un número complejo con tres partes imaginarias diferentes.

Por lo tanto, usando la rotación de números complejos tenemos

$$q = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z$$

un cuaternión con una parte real  $q_0$  y tres partes imaginarias  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$ .

Para permanecer en el espacio tridimensional hace falta hacer desaparecer la parte real del cuaternión ( $q_0=0$ ). Lo que tendremos entonces serán cuaterniones unitarios:

$$q = iq_x + jq_y + kq_z$$

La solución para el cuaternión que deseamos utilizar es el vector propio de una matriz simétrica 4x4 asociada con el valor propio más positivo. Los elementos de esta matriz son combinaciones sencillas de sumas de productos de las coordenadas correspondientes de los puntos. Para encontrar los valores propios deberemos resolver una ecuación de cuarto grado cuyos coeficientes son sumas de productos de elementos de la matriz. Se muestra que este cuarto grado es particularmente simple, ya que uno de sus coeficientes es cero. Se simplifica aún más cuando uno o el otro de los conjuntos de mediciones es coplanar.

En este proyecto vamos a usar un algoritmo que emplea cuaterniones para poder realizar las rotaciones de la transformación tridimensional de semejanza. Este algoritmo fue creado por el Dr Christian Wengert y el Dr Gerald Bianchi del ETHZ (Escuela Politécnica Federal de Zúrich) y está basado en el documento de Berthorl K.P. llamado "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions" (Solución de forma cerrada de la orientación absoluta usando cuaterniones unitarios).

Utilizando este algoritmo, hemos creado un código en matlab que nos permite calcular la transformación tridimensional de semejanza de forma rápida y menos laboriosa que con matrices de rotación.

A continuación asignaremos al punto 44 las coordenadas (10000, 10000, 10000) ya que éste será el origen de nuestro sistema de coordenadas. De esta manera fijaremos la cámara, que estará a una profundidad de 60 cm tomando como origen el panel (44 cm (ya que es la marca del carril) + 16 cm (del tamaño de la cámara)).

Se aplicarán los parámetros de cada transformación al panel para tener las coordenadas terreno definitivas (Paneles-TOT). De esta manera ya tendremos los archivos necesarios para poder realizar la calibración con el módulo Calibra de Digi3D.



Una vez finalizamos este procedimiento nos dimos cuenta de que no era correcto dejar el panel fijo ya que en las orientaciones posteriores aparecía un error mayor del estimado. Ésta es la razón por la que decidimos volver a realizar la toma de datos completa en el laboratorio.

## 2. Cámara fija

Este proceso comienza igual que el caso 1, realizamos de la misma forma la correlación de las imágenes y la transformación polinómica de cuarto grado para tener las coordenadas píxel del panel de calibración.

A continuación con una transformación tridimensional de semejanza llevaremos el panel de calibración de la marca 70 a las demás para conocer las coordenadas terreno del panel en cada marca (70-44, 70-57, 70-64). El resto del proceso será el mismo que hemos realizado cuando fijamos el panel. Tendremos un archivo de coordenadas píxel y otro de coordenadas terreno y ya podremos realizar la calibración.

### 3.6 Metodologías para la obtención de coordenadas

#### 3.6.1 Coordenadas del panel de test y de las cámaras por topografía

En el laboratorio, como hemos explicado anteriormente, vamos a dotar de coordenadas topográficas al panel de test midiéndolos la estación total y el teodolito electrónico. Asimismo mediremos tanto las coordenadas de los puntos de la cámara primaria como las coordenadas de los puntos de la cámara secundaria.

#### 3.6.2 Coordenadas del panel de test por fotogrametría

##### 3.6.2.1 Pares fotogramétricos con cámara primaria

En este apartado seguiremos los pasos del método general de la fotogrametría. Este método nos permite determinar la forma de un haz perspectivo (orientación interna), determinar la posición de un haz perspectivo (orientación externa, relativa y absoluta), identificar las parejas de rayos perspectivos homólogos (visión estereoscópica) y la búsqueda y materialización de las intersecciones de parejas de rayos homólogos (restitución).

Tras realizar anteriormente la orientación interna continuaremos con la orientación relativa. La orientación relativa es el procedimiento que permite que situemos un haz respecto al otro de tal forma que todas las parejas de rayos homólogos se corten siendo el conjunto de las intersecciones el modelo. Son homólogos los rayos que se fusionen estereoscópicamente. Con este proceso conseguimos ver dos imágenes en tres dimensiones aunque separaremos las imágenes para hacerlo monoscópicamente.

Previamente mediremos las coordenadas de los puntos del panel de test y de una serie de puntos del panel de calibración por correlación con un programa en Matlab. Esto nos permite tener mejores precisiones en la orientación absoluta y asimismo en los resultados finales de la orientación tras la restitución.

Necesitamos añadir un archivo de patrón de calibración (que será una imagen de una cruz del panel de calibración) y un patrón de test (en este caso una imagen de una de las cruces del test) y cada una de las tres imágenes de la cámara primaria en blanco y negro. Iremos numerando las cruces de los paneles en columna y fila (en nuestro caso para aclararnos mejor llamaremos en el panel de test 0 a la fila y meteremos el número de la cruz, de 101 a 154, en la columna, mientras que en el panel de calibración los puntos irán con la columna y la fila correspondientes de la misma manera que numeramos en campo) y nos posaremos sobre la cruz que queremos medir. El programa hace una estimación del centro de la cruz y nos genera dos archivos, uno con las coordenadas píxel de cada marca y otro archivo de error si no pudiese detectar la marca medida.

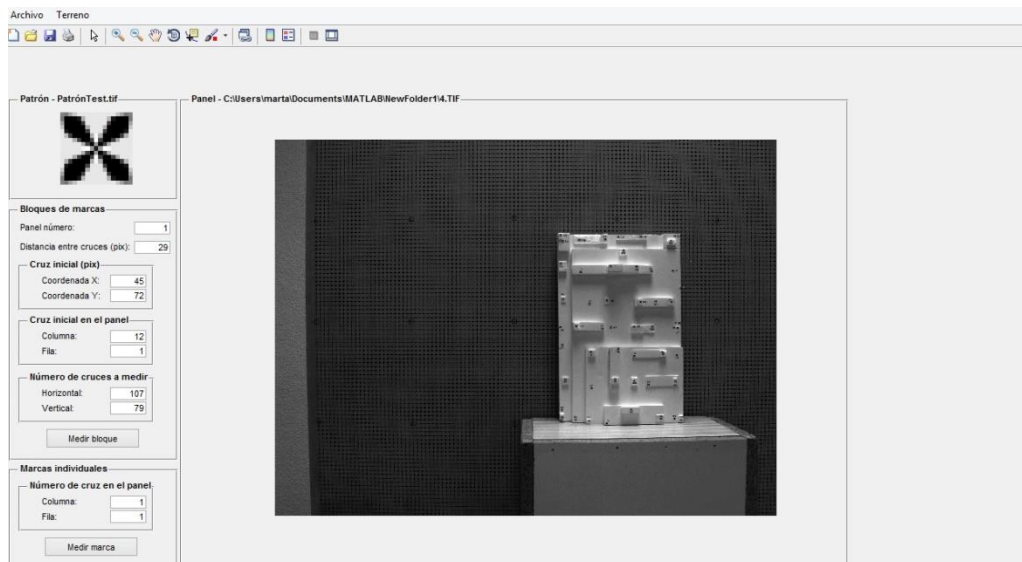


Figura 37. Correlación de los puntos del panel de calibración y del panel de test

Una vez obtenidas las coordenadas píxel introduciremos en Digi3D el archivo que obtuvimos en la calibración para que el programa conozca la focal y las coordenadas del punto principal (parámetros internos). Adjuntaremos a Digi3D el primer par de fotografías tomadas con la cámara primaria, las fotos 4 y 5, y comenzaremos a realizar la orientación relativa.

En la primera toma de datos se midieron los seis puntos más extremos del panel (101, 108, 122, 129, 143, 150) mientras que en la segunda toma se midieron un total de catorce puntos repartidos por la fotografía de manera uniforme.

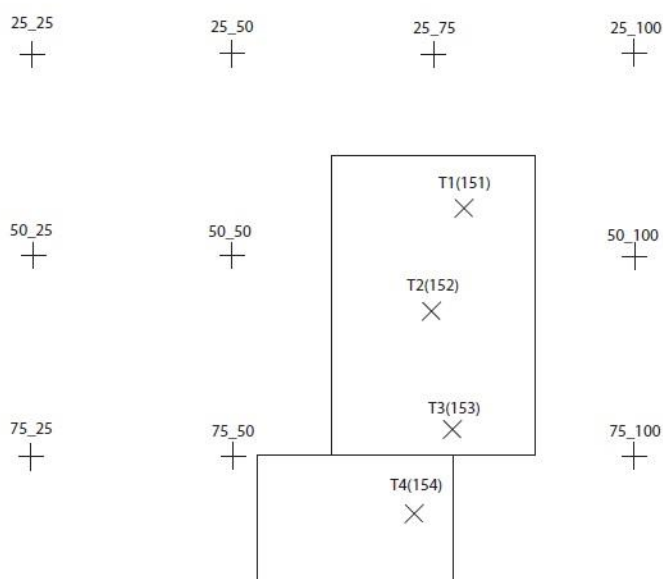
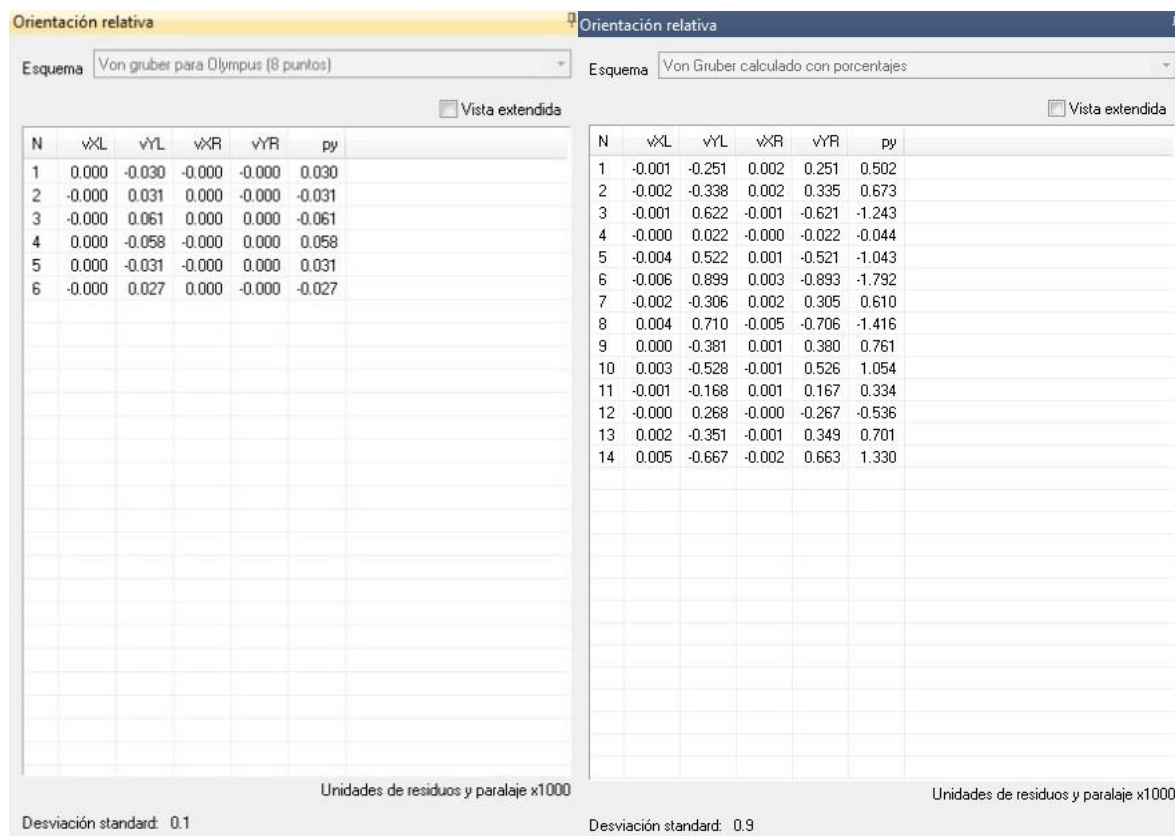
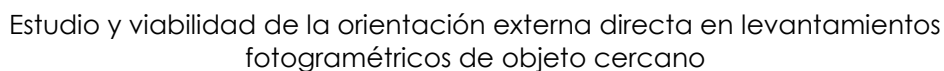


Figura 38. Disposición de los puntos elegidos para la orientación relativa y absoluta

En primer lugar se reconocen puntos comunes en ambas imágenes con los que obtendremos el modelo. Con estos puntos en ambas imágenes podremos relacionar ambos haces perspectivos utilizando las condiciones de colinealidad, ya que Digi3D utiliza estas condiciones para realizar la orientación relativa. La condición de colinealidad establece que para cualquier fotografía dada, el punto de proyección, el punto objeto y el punto terreno objeto proyectado en la imagen se deben encontrar en la misma recta, cumpliéndose esta condición los rayos homólogos intersectan en el punto prefijado. De esta forma, el software realiza una intersección inversa espacial. El mínimo número de puntos necesario para realizar la orientación relativa usando la condición de colinealidad es de cinco: ya que tengo cinco parámetros de orientación ( $b_y$ ,  $b_z$ ,  $w_2$ ,  $\Phi_2$ ,  $\kappa_2$ ) más tres incógnitas correspondientes a las coordenadas del espacio objeto para cada punto observado, cada punto medido nos proporcionará cuatro ecuaciones por lo que el mínimo número de puntos para resolver el sistema es de cinco, como necesitamos redundancia, en nuestro caso medimos seis puntos por fotograma y en la segunda toma de datos serán catorce.

Para medir los puntos de cada imagen nos apoyaremos en los archivos de coordenadas obtenidos en el programa de Matlab por correlación (el de ambas imágenes ya que se mide primero el punto en la imagen izquierda para después hacerlo en la derecha), de esta manera evitaremos tener posibles errores causados por ser operador inexperto y así obtener mejores precisiones. Teniendo en cuenta la cámara utilizada, la precisión requerida en la orientación relativa será de 1,8 micras (un tercio del tamaño del píxel siendo éste 5,31 micras) entrando dentro de tolerancia la desviación estándar obtenida en nuestra medición, 1 micra.



Con la orientación relativa lo que obtenemos son las coordenadas modelo de los puntos medidos. El programa generará un archivo de extensión .rel donde aparecerán dichas coordenadas y los residuos de éstas.

Una vez finalizada la orientación relativa pasaremos a la orientación absoluta. En la orientación absoluta ajustaremos el modelo a un sistema de referencia del espacio objeto mediante una transformación tridimensional de semejanza (transformación Helmert 3D), para ello necesitaremos conocer las coordenadas de una serie de puntos en ese sistema objeto bien definidos en la figura con los que poder relacionarlo con el sistema modelo. Los puntos de apoyo escogidos serán los mismos que elegimos en la orientación relativa para mayor fiabilidad de las observaciones.

Para realizar la orientación absoluta el software realiza una transformación tridimensional de semejanza. Cada punto del que conozcamos sus coordenadas tanto en sistema modelo como terreno nos proporcionará tres ecuaciones, esto quiere decir que el mínimo número de puntos necesarios para conocer el valor de los parámetros de transformación es de tres. Como necesitamos tener redundancia para obtener el valor de los parámetros con la mayor precisión posible mediremos más puntos que el mínimo con los que realizar el ajuste (anteriormente hemos dicho que el número de puntos escogido para la orientación absoluta es el mismo que para la orientación relativa).

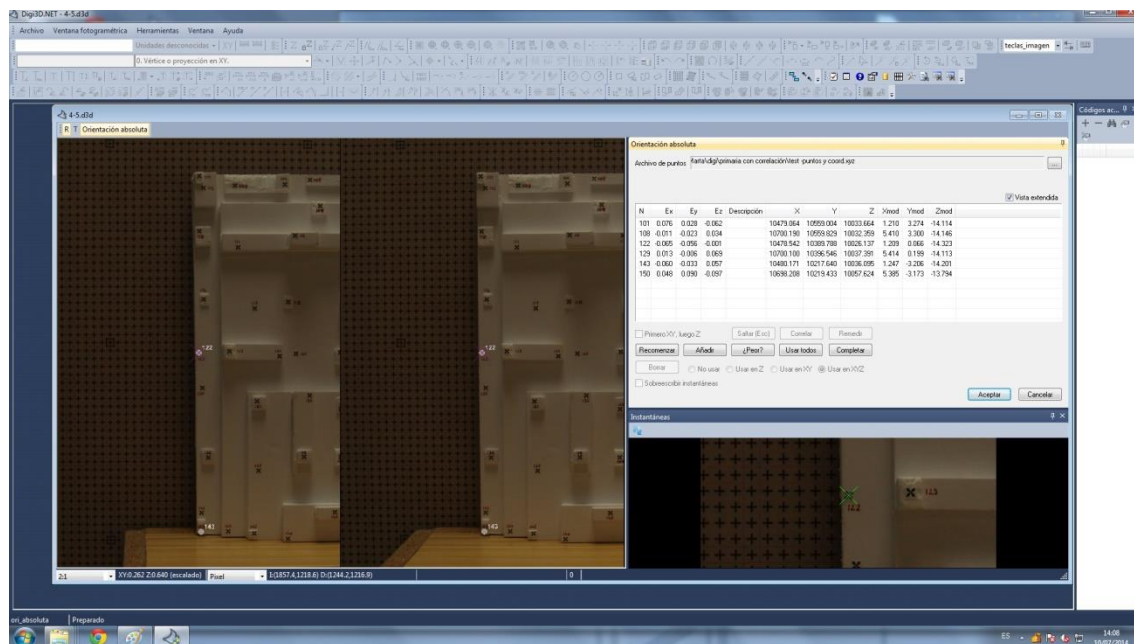


Figura 40. Medición de la orientación absoluta

Tendremos que añadir como archivo de puntos el obtenido por topografía clásica en el laboratorio y mediremos apoyándonos en las coordenadas píxel halladas por correlación con Matlab.

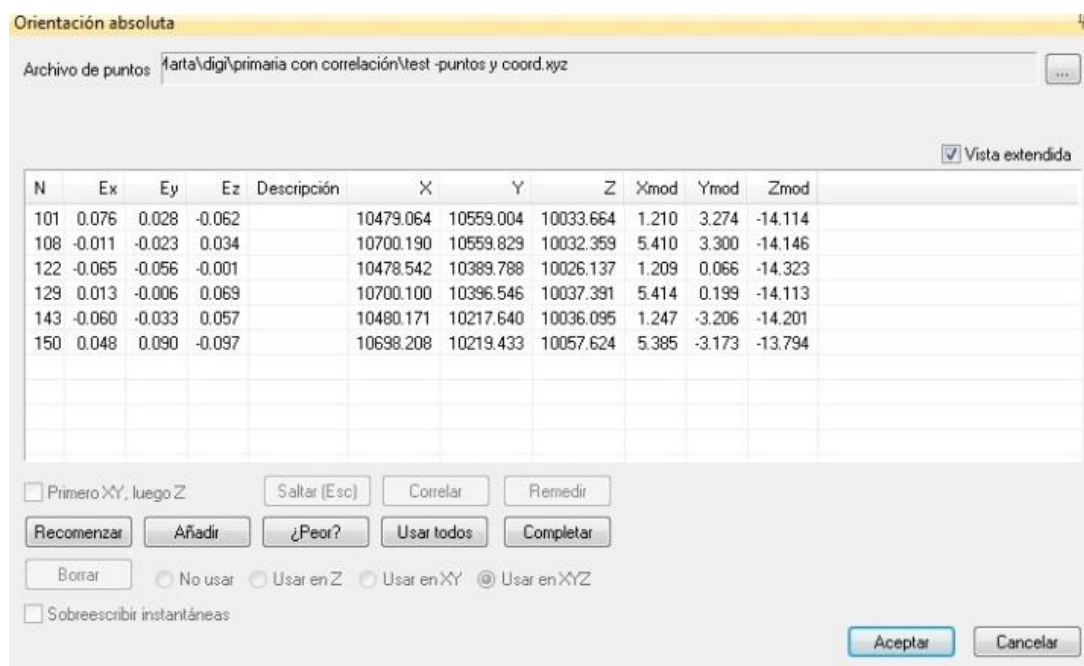


Figura 41. Resultados de la orientación absoluta en la primera toma



**Orientación absoluta**

Archivo de puntos

☐ Vista extendida

N	Ex	Ey	Ez	Descripción
2525	0.116	-0.096	0.095	
2550	-0.058	0.058	-0.104	
2575	-0.015	0.038	0.153	
25100	0.006	0.003	-0.106	
5025	-0.044	0.031	-0.227	
50100	0.215	0.058	-0.123	
7525	0.061	0.025	0.077	
7550	0.002	0.044	0.327	
75100	-0.090	0.029	0.325	
151	-0.103	0.061	0.053	
152	-0.043	-0.010	0.141	
153	-0.004	-0.133	-0.337	
154	-0.044	-0.107	-0.275	

☐ Primero XY, luego Z    Salir (Esc)    Correlar    Remedir  
 Recomenzar    Añadir    ¿Peor?    Usar todos    Completar  
    ☐ No usar    ☐ Usar en Z    ☐ Usar en XY    ☐ Usar en XYZ  
☐ Sobreescribir instantáneas       

Figura 42. Resultados de la orientación absoluta en la segunda toma

Las precisiones a obtener en la orientación absoluta no deben de ser mayores a 0,8 mm en altimetría; en la fotografía anterior observamos que las observaciones entran todas dentro de la tolerancia establecida.

El último paso del método general de la fotogrametría es la restitución. La restitución consiste, tras la formación de pares estereoscópicos en el proceso de orientación de imágenes, en la extracción de los elementos contenidos en ellas. En nuestro caso extraeremos las coordenadas de los puntos del test dibujando dichos puntos.

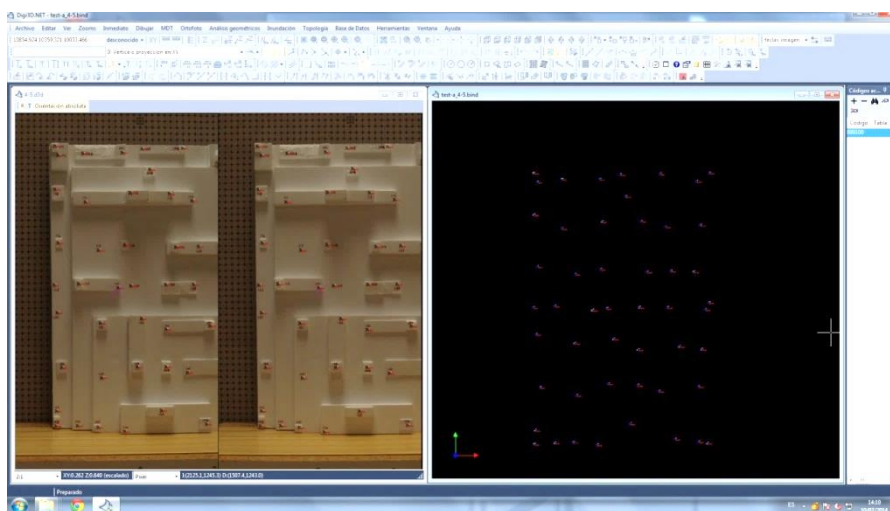


Figura 43. Restitución del panel de test

Adjuntaremos el archivo de puntos obtenidos en el laboratorio por topografía clásica para compararlos con los obtenidos con la orientación de los pares.

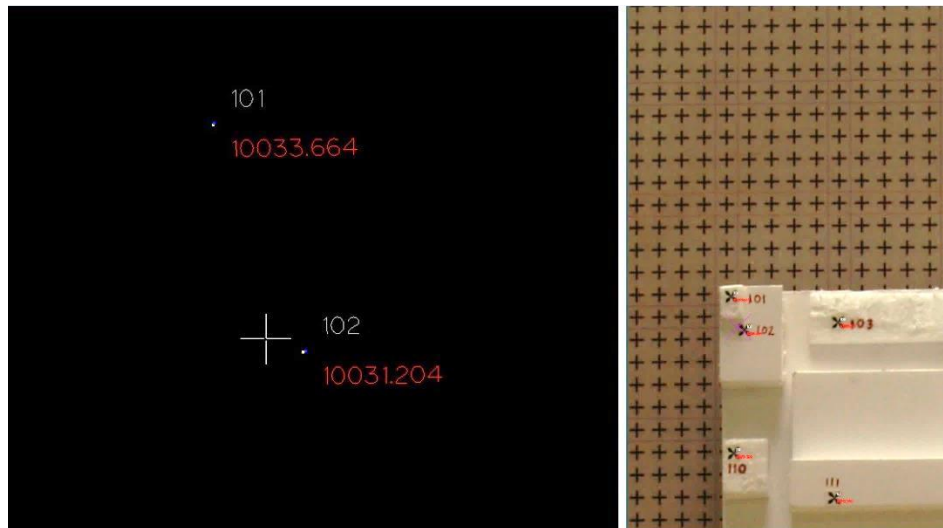


Figura 44. Comparación de los puntos restituídos con los obtenidos en campo

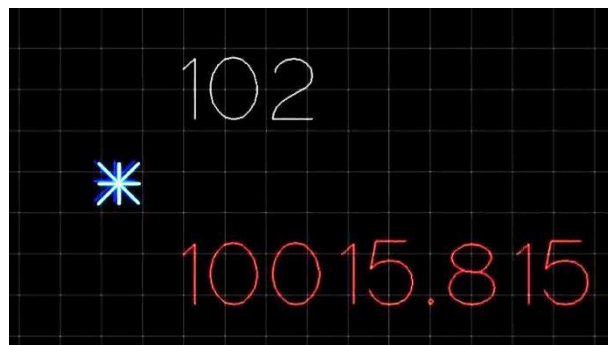


Figura 45. Vista en detalle de la diferencia entre los puntos

Una vez medido el primer par, seguiremos el mismo proceso con el par 5-6 (la única diferencia será que en la segunda toma de datos de este par los puntos 25\_25, 50\_25 y 75\_25 no aparecen en la imagen 6 por lo tanto no los incluiremos en las orientaciones). Los resultados obtenidos de los puntos del panel de test serán exportados en un fichero .xyz para poder compararlos con los obtenidos a través de los demás métodos.

### 3.6.2.2 Con los parámetros externos directos

En este apartado lo que queremos conseguir es hacer la orientación con los parámetros de orientación externa (centros de proyección y giros). Para llegar a obtener los parámetros de orientación externa en el sistema test partiremos de los parámetros de orientación externa que obtenemos en la calibración.



```

X= 10576.2075 m    0.0032
Y= 10401.5547 m    0.0031
Z= 10716.2141 m    0.0070
W= -0.2120         5.0E-04
PHI= 1.0818         4.1E-04
K= 0.1194          1.2E-04
  
```

Para el cálculo de los centros de proyección de las tres imágenes en el sistema test vamos a realizar una transformación tridimensional de semejanza. Como tenemos puntos comunes en ambos sistemas (conocemos las coordenadas de los cinco tornillos tras la toma de datos en laboratorio) podremos calcular con ellos los parámetros de transformación y a través de ellos calcular los centros de proyección en el sistema test. Esta transformación la vamos a realizar tanto con factor de escala como sin el para comprobar la variación de los resultados.

\*\*\* Parámetros de la Transformación \*\*\*

Factor de escala  
s=1.00073

Matriz de rotación  
R=0.99947 -0.00052 -0.03251  
0.00027 0.99997 -0.00746  
0.03252 0.00745 0.99944

Giros  
Omega=-0.99036  
Fi=-2.07035  
Kappa=-0.03648

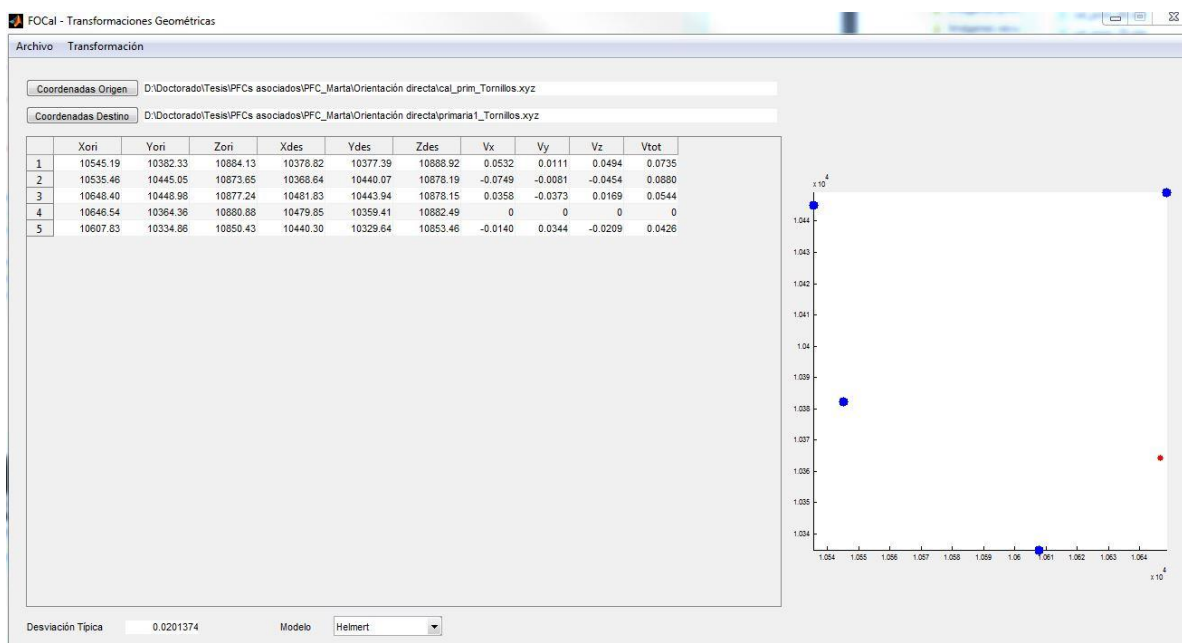


Figura 46. Transformación de los tornillos de calibrado a test en la primera toma

## \*\*\* Parámetros de la Transformación \*\*\*

Factor de escala  
 $s=1.00000$

Matriz de rotación  
 $R=0.99947 \quad -0.00052 \quad -0.03251$   
 $0.00027 \quad 0.99997 \quad -0.00746$   
 $0.03252 \quad 0.00745 \quad 0.99944$

Giros  
 $\Omega=-0.99036$   
 $\Phi=-2.07035$   
 $\Kappa=-0.03648$

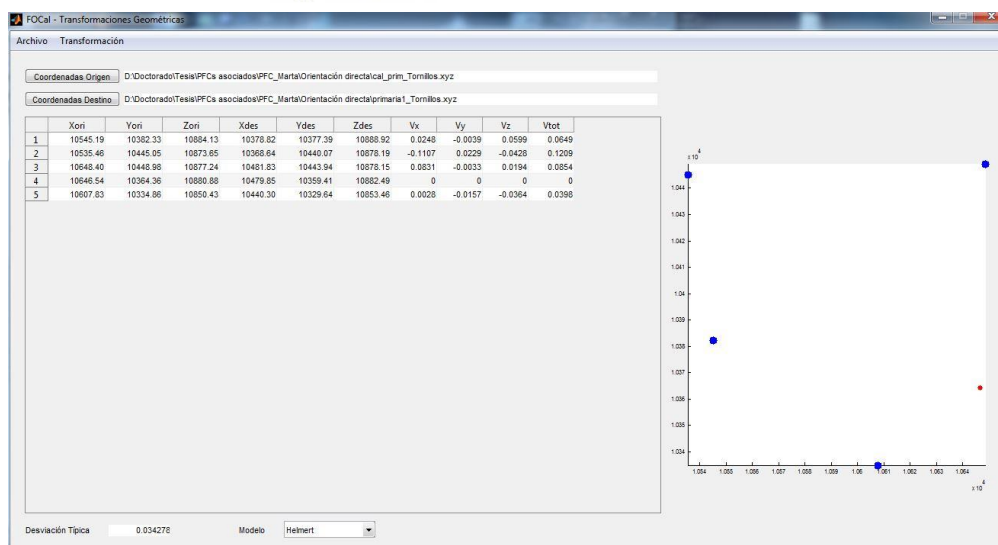


Figura 47. Transformación de los tornillos de calibrado a test en la segunda toma

En ambas transformaciones hemos quitado el punto 4 del cálculo ya que sus residuos eran muy grandes. Una vez conocidas las coordenadas de los centros de proyección en el sistema test necesitamos conocer los giros en este sistema.

Como no conocemos la ecuación del eje óptico de la cámara, para obtener los giros nos vamos a apoyar en la recta perpendicular al plano de los tornillos y la recta perpendicular al panel de calibración y vamos a solucionar el problema geoméricamente. Para ver mejor la geometría vamos a hacer las diferencias angulares proyectándolo sobre el plano XZ.

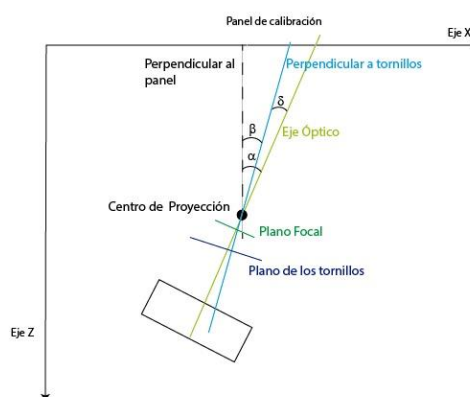


Figura 48. Esquema de la geometría de los distintos ángulos

Tras la calibración conocemos el ángulo que forman el Eje Óptico con los ejes del sistema de coordenadas calibrado, al que llamaremos  $\alpha$ . En proyección XZ, este mismo ángulo será igual al que forman el eje óptico con la perpendicular al panel, ya que es paralela al eje Z. Por otro lado al conocer las coordenadas tanto del panel de calibración como de los tornillos en el sistema calibrado podremos formar dos planos y obtener las perpendiculares a éstos y así obtendremos otro ángulo, el formado por ambas perpendiculares al que denominaremos  $\beta$ .

Vamos a calcular el ángulo  $\beta$  por tres métodos: mediante transformaciones, proyecciones y por proyecciones y giros. Todo el cálculo de este apartado lo realizaremos con Matlab y para ello creamos un programa llamado OriDirecta.m que iremos explicando a continuación el cálculo que realiza.

Calcularemos el plano que mejor se ajusta a los cinco tornillos en calibración por los tres métodos. El programa nos calcula un vector normal, una base ortonormal y un punto pertenecientes al plano.

Antes de seguir con el cálculo dibujaremos en Microstation el plano de los tornillos en calibración, las proyecciones de los tornillos sobre el plano y observamos los ángulos que forma la perpendicular al plano con los ejes del sistema de coordenadas. Como se puede ver en las imágenes siguientes el ángulo kappa no es el correcto, esto nos dará problemas en el cálculo de los ángulos ya que el programa podría hacer la misma interpretación errónea.

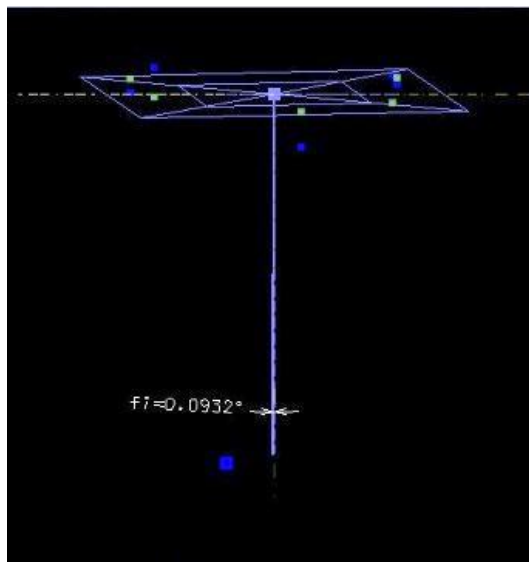


Figura 49. Vista derecha en Microstation

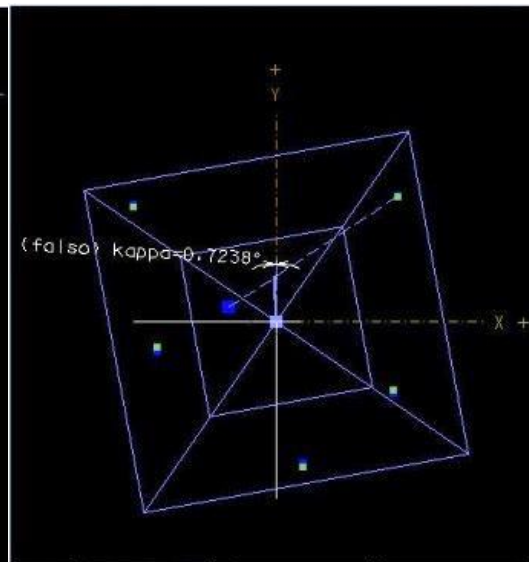


Figura 50. Planta en Microstation

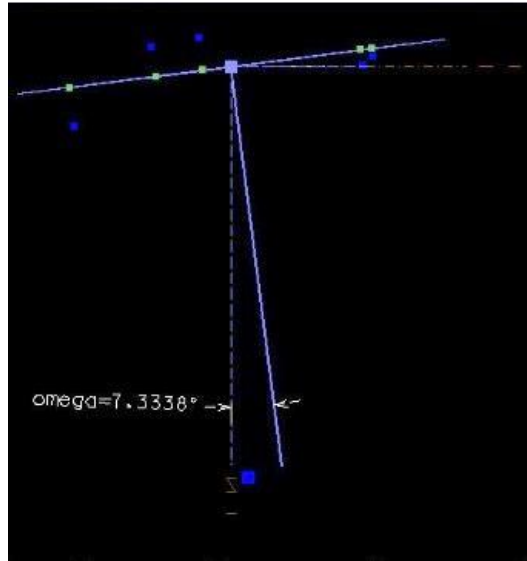


Figura 51. Alzado en Microstation

Para el cálculo por transformaciones hallaremos el plano que forma el panel de calibración y realizaremos una transformación tridimensional de semejanza para conocer los ángulos de giro entre ambos planos en el sistema calibrado. Mediante proyecciones calcularemos los ángulos existentes entre el vector normal al plano de los tornillos y las proyecciones de los ejes del sistema de coordenadas. Y por último si empleamos proyección y giro lo que haremos será realizar el giro  $\omega$  y proyectar en el plano YZ; girar en  $\phi$  y proyectar en XZ y por último el giro en  $\kappa$  lo dejaremos igual que el que obtuvimos en la calibración (como explicamos anteriormente puede no ser correcto).

Con ambos ángulos ya calculados podremos hallar el ángulo  $\delta$  ya que éste será igual a  $\delta = \beta - \alpha$ . Esto será teniendo en cuenta el caso que hemos supuesto de disposición de las rectas (en las imágenes siguientes corresponderá al caso 5) pero tendremos un total de 6 casos posibles:

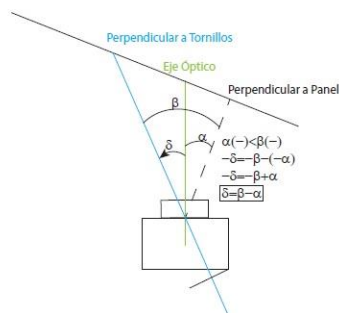


Figura 52. Caso 1

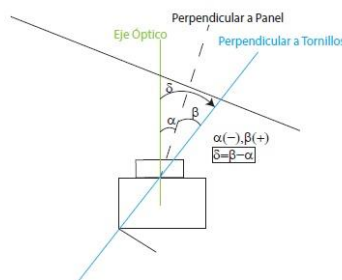


Figura 53. Caso 2

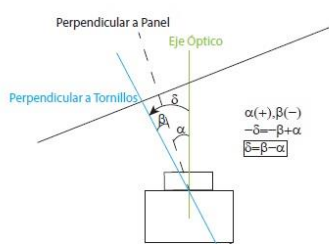


Figura 54. Caso 3

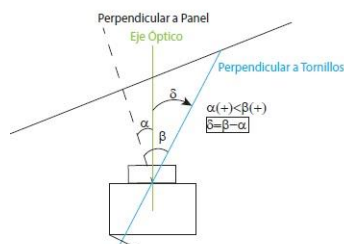


Figura 55. Caso 4

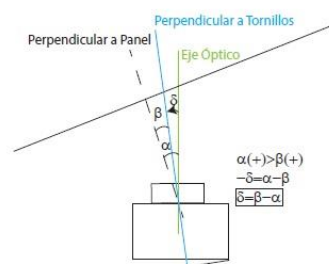


Figura 56. Caso 5

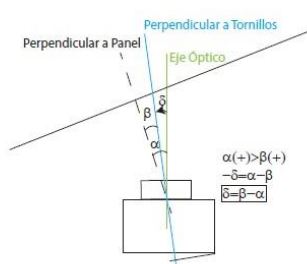


Figura 57. Caso 6

Como podemos observar en las imágenes, para el cálculo de  $\delta$  tendremos la misma solución. Aun así vamos a realizar el cálculo con todas las combinaciones posibles para ver cuál es la que mejor se ajusta a los datos requeridos. Estas combinaciones serán  $\delta = \beta - \alpha$ ,  $\delta = \beta + \alpha$  y  $\beta = \alpha - \beta$ .

A continuación realizaremos el proceso a la inversa en el sistema test. El ángulo  $\delta$  no variará al cambiar de sistema de coordenadas y el ángulo  $\beta$  se calculará de la misma manera pero con la recta perpendicular al plano de los tornillos en el sistema test y los nuevos ejes del sistema de coordenadas. Por lo tanto ya podremos calcular el ángulo  $\alpha$  en el sistema test teniendo en cuenta otra vez las tres combinaciones:  $\alpha = \beta - \delta$ ;  $\alpha = \delta - \beta$  y  $\alpha = \delta + \beta$ .

Por transformaciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	-7,3338	-0,0924	-55,3720
d1=cali-tor	7,1430	1,0660	55,4795
d2=tor-cali	-7,1430	-1,0660	-55,4795
d3=cali+tor	-7,5247	0,8812	-55,2644
tor1	-6,9147	-1,9334	-55,1766
tor1+d1	0,2283	-0,8674	0,3029
tor1+d2	-6,9147	-1,9334	-55,1766
tor1+d3	-14,4394	-1,0522	-110,4410
tor1-d1	-14,0577	-2,9995	-110,6560
tor1-d2	7,3713	0,1986	55,7824
tor1-d3	0,6100	-2,8147	0,0879
d1-tor1	14,0577	2,9995	110,6560
d2-tor1	-7,3713	-0,1986	-55,7824
d3-tor1	-0,6100	2,8147	-0,0879
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	0,2283	-0,8674	0,3029
Diferencia	-0,1723	1,7674	-0,4494

Figura 58. Resultados por transformaciones en el fotograma 4

Por proyecciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0932	0,7239
d1=cali-tor	-7,5247	0,8804	-0,6163
d2=tor-cali	7,5247	-0,8804	0,6163
d3=cali+tor	7,1430	1,0668	0,8314
tor1	-6,9147	1,9476	15,6635
tor1+d1	-14,4394	2,8280	15,0471
tor1+d2	0,6100	1,0672	16,2798
tor1+d3	0,2283	3,0144	16,4948
tor1-d1	0,6100	1,0672	16,2798
tor1-d2	-14,4394	2,8280	15,0471
tor1-d3	-14,0577	0,8808	14,8321
d1-tor1	-0,6100	-1,0672	-16,2798
d2-tor1	14,4394	-2,8280	-15,0471
d3-tor1	14,0577	-0,8808	-14,8321
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-14,4394	2,8280	15,0471
Diferencia	14,4954	-1,9280	-15,1936

Figura 59. Resultados por proyecciones en el fotograma 4



Por proyecciones y giros			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0955	0,1075
d1=cali-tor	-7,5247	0,8781	0,0000
d2=tor-cali	7,5247	-0,8781	0,0000
d3=cali+tor	7,1430	1,0691	0,2150
tor1	6,9147	1,9911	0,1075
tor1+d1	-0,6100	2,8692	0,1075
tor1+d2	14,4394	1,1130	0,1075
tor1+d3	14,0577	3,0602	0,3225
tor1-d1	14,4394	1,1130	0,1075
tor1-d2	-0,6100	2,8692	0,1075
tor1-d3	-0,2283	0,9220	-0,1075
d1-tor1	-14,4394	-1,1130	-0,1075
d2-tor1	0,6100	-2,8692	-0,1075
d3-tor1	0,2283	-0,9220	0,1075
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-0,2283	0,9220	-0,1075
Diferencia	0,2843	-0,0220	-0,0390

Figura 60. Resultados por proyecciones y giros en el fotograma 4

Una vez obtenidos los ángulos de giro y los centros de proyección en el sistema test ya podremos formar el archivo de orientación directa. Este archivo tendrá extensión .eo y estará formado por el centro de proyección y los ángulos de giro en cada una de las tres posiciones de la cámara primaria.

orientacionexternat: Bloc de notas						
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
4	10404.345	10395.357	10719.888	0.2283	-0.8674	0.3029
5	10567.612	10395.325	10713.814	0.0355	-1.0164	0.0079
6	10741.421	10396.685	10722.345	-0.2058	-0.9968	0.1541

Figura 61. Orientación externa por transformación

Tras formar el archivo, abriremos un proyecto en Digi3D con los fotogramas, el archivo .eo y el archivo de orientación interna y obtendremos los siguientes resultados:

Con transformación:

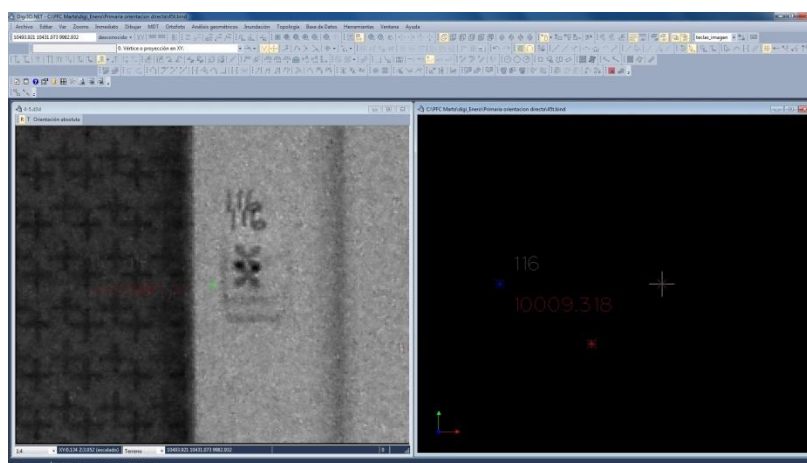


Figura 62. Orientación externa por transformación, vista en detalle punto

Con proyección:

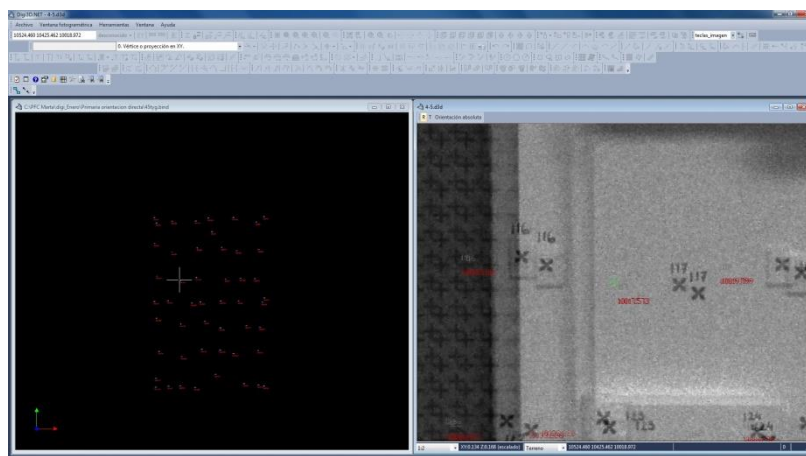


Figura 63. Orientación externa por proyección, vista en detalle punto 116

Con proyección y giro:

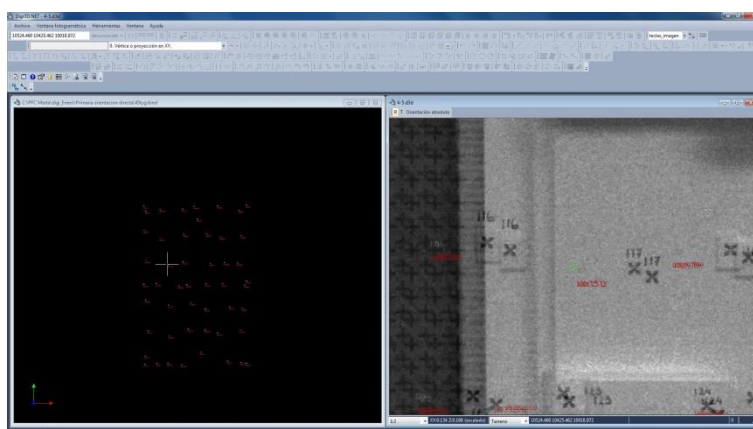


Figura 64. Orientación externa por proyección y giro, vista en detalle punto 116

Como podemos observar, tanto en las imágenes como en las tablas, los resultados obtenidos a través de este método no son viables ya que la orientación que hemos obtenido no es la correcta, ya que se aprecia mucha paralaje vertical. De esta manera, al no obtener resultados no podremos restituir los puntos del sistema test y por lo tanto no podremos obtener coordenadas de dichos puntos para realizar el análisis con otros métodos.

### 3.6.2.3 Pares fotogramétricos con la cámara secundaria

En este apartado seguiremos los mismos pasos que para los pares fotogramétricos con la cámara primaria, diferenciándose éste en que los puntos de apoyo elegidos serán los cuatro puntos de la cámara primaria. Para este método tendremos tres pasadas formadas por tres fotogramas cada una.

Introduciremos el archivo de orientación interna obtenido en la calibración de la cámara secundaria y realizaremos la orientación relativa. Para este apartado elegiremos los puntos de relativa de tal manera que la zona de la cámara primaria en la fotografía esté totalmente cubierta. En la primera medición estos puntos serán los siguientes:

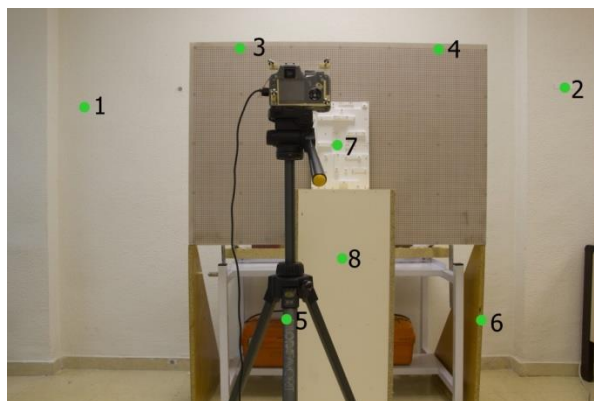


Figura 65. Puntos elegidos para orientación relativa durante la primera toma

En cambio en la segunda medición los puntos estarán situados en una construcción auxiliar que rodea los paneles y la cámara (de 201 a 207) y en el trípode de la cámara primaria (llamándolo 215 en la primera pasada, 225 en la segunda y 235 en la tercera).

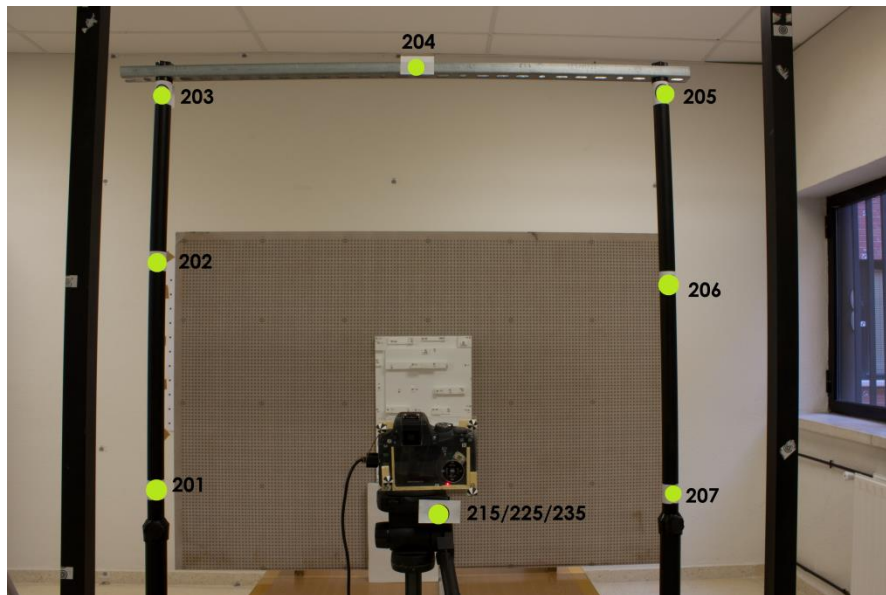


Figura 66. Puntos elegidos para orientación relativa durante la segunda toma

La precisión que queremos obtener en orientación relativa es de 1,5 micras que redondearemos a 2 micras.



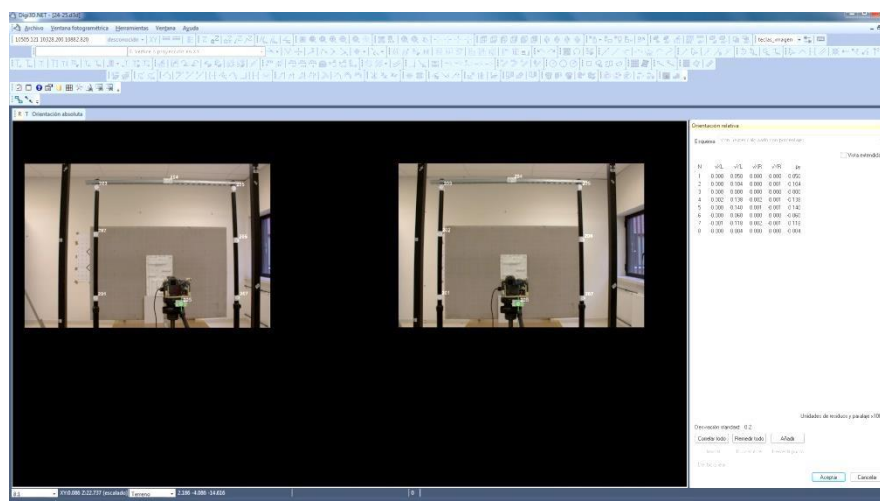


Figura 67. Vista general de la orientación relativa del par 24-25

Orientación relativa					
Esquema Von Gruber calculado con porcentajes					
<input type="checkbox"/> Vista extendida					
N	$\omega_L$	$\omega_R$	$\omega_Y$	$\omega_Z$	$\omega_X$
1	0.000	-0.050	-0.000	-0.000	0.050
2	0.000	0.104	-0.000	0.001	-0.104
3	0.000	0.000	-0.000	0.000	-0.000
4	0.002	0.138	-0.002	0.001	-0.138
5	-0.000	-0.140	0.001	-0.001	0.140
6	-0.000	0.060	0.000	0.000	-0.060
7	-0.001	-0.118	0.002	-0.001	0.118
8	-0.000	0.004	0.000	0.000	-0.004
Unidades de residuos y paralaje x1000					
Desviación standard: 0.2					

Orientación relativa					
Esquema Von Gruber calculado con porcentajes					
<input type="checkbox"/> Vista extendida					
N	$\omega_L$	$\omega_R$	$\omega_Y$	$\omega_Z$	$\omega_X$
1	0.000	-0.012	-0.000	-0.000	0.012
2	-0.000	-0.047	0.000	-0.000	0.047
3	-0.000	-0.002	0.000	-0.000	0.002
4	0.000	0.018	-0.000	0.000	-0.018
5	0.000	-0.091	0.000	-0.000	0.091
6	-0.000	0.004	0.000	0.000	-0.004
7	0.000	0.059	-0.001	0.000	-0.059
8	-0.001	0.059	0.001	0.000	-0.059
Unidades de residuos y paralaje x1000					
Desviación standard: 0.1					

Figura 68. Resultados de la orientación relativa del par 24-25 en ambas tomas

Para la orientación absoluta necesitamos las coordenadas terreno de los puntos que queramos medir, elegiremos los mismo que en la orientación relativa para mayor comodidad. Igual que en la orientación absoluta de los pares de la cámara primaria la precisión establecida para esta orientación es de 0,8 mm en alímetría.

Orientación absoluta					Orientación absoluta				
Archivo de puntos					Archivo de puntos				
C:\ProgramData\Trimble\Trimble\segunda pasada\apoyo2\XYZ					C:\ProgramData\Trimble\Trimble\segunda pasada\apoyo2\XYZ				
Vista extendida					Vista extendida				
N	Ex	Ey	Ez	Descripción	N	Ex	Ey	Ez	Descripción
201	-0.480	-0.154	0.668		201	-0.086	-0.639	0.175	
202	-0.216	0.323	-0.759		202	-0.019	0.055	0.123	
203	0.217	0.270	-0.194		203	-0.019	0.416	-0.009	
204	0.106	0.043	0.183		204	0.300	0.176	-0.064	
205	-0.830	-0.710	0.869		205	-0.092	-0.470	-0.019	
206	0.060	0.240	-0.882		206	-0.164	0.094	0.076	
207	0.360	-0.017	0.113		207	0.080	0.369	0.276	
225	0.784	0.005	0.003		225			-0.559	

Figura 69. Resultados de la orientación absoluta del par 24-25 en ambas tomas

Una vez hecha las orientaciones podremos restituir los tornillos de la cámara y compararlos con las observaciones de campo.

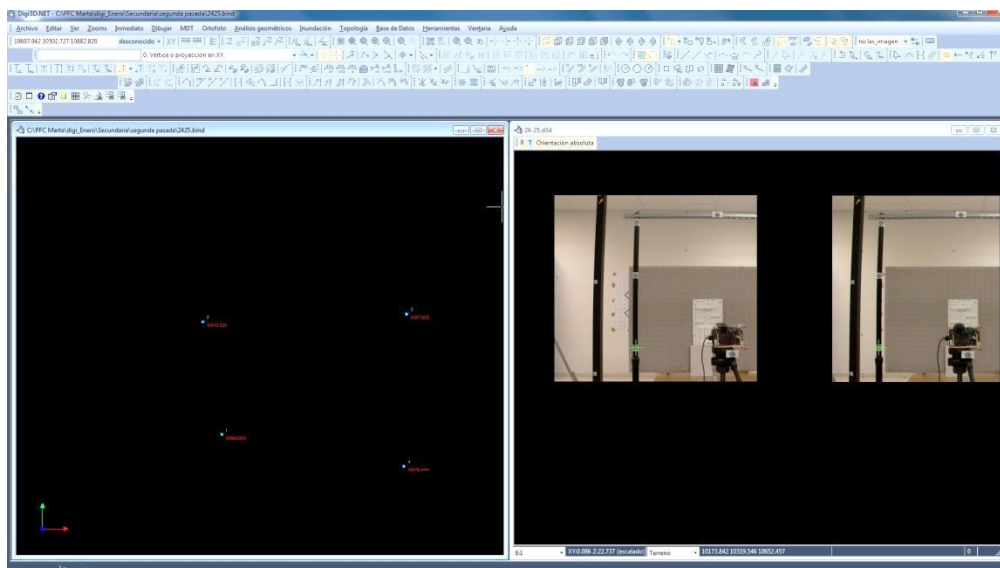


Figura 70. Restitución de los tornillos en el par 24-25 y comparación con los obtenidos en campo

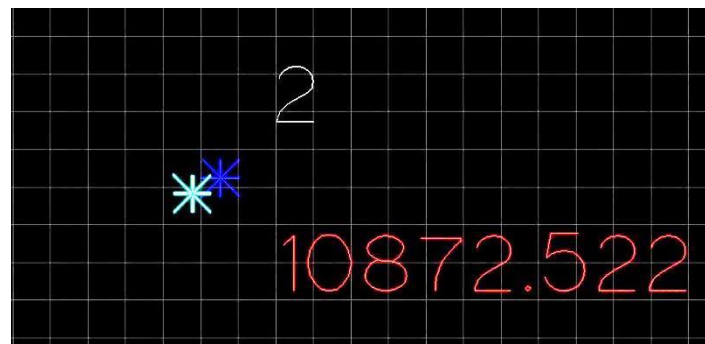


Figura 71. Vista en detalle de la diferencia entre las coordenadas de los tornillos



Como hemos dicho al comienzo de este apartado, tendremos tres pasadas con tres fotografías cada una de ellas. Por lo tanto tendremos las fotos 14, 15 y 16 en la primera pasada (pares 14-15 y 15-16); 24, 25 y 26 en la segunda pasada (pares 24-25 y 25-26) y 34, 35 y 36 en la tercera (pares 34-35 y 35-36).

Una vez restituidos los puntos de la cámara seguiremos el mismo proceso que en la orientación externa directa para conseguir las coordenadas del panel de test. Tras realizar todo el proceso obtenemos los mismos resultados negativos que con el caso de la primaria, por lo tanto con este método tampoco podremos realizar el análisis de las precisiones de las coordenadas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos por los tres procedimientos:

Por transformaciones:

Por transformaciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	-7,3338	-0,0924	-55,3720
d1=cali-tor	7,1430	1,0660	55,4795
d2=tor-cali	-7,1430	-1,0660	-55,4795
d3=cali+tor	-7,5247	0,8812	-55,2644
tor1	-6,8981	-1,9116	-55,3692
tor1+d1	0,2449	-0,8456	0,1103
tor1+d2	-6,8981	-1,9116	-55,3692
tor1+d3	-14,4228	-1,0304	-110,6336
tor1-d1	-14,0411	-2,9776	-110,8487
tor1-d2	7,3879	0,2204	55,5897
tor1-d3	0,6266	-2,7928	-0,1048
d1-tor1	14,0411	2,9776	110,8487
d2-tor1	-7,3879	-0,2204	-55,5897
d3-tor1	-0,6266	2,7928	0,1048
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	0,2449	-0,8456	0,1103
Diferencia	-0,1889	1,7456	-0,2568

Por transformaciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	-7,3338	-0,0924	-55,3720
d1=cali-tor	7,1430	1,0660	55,4795
d2=tor-cali	-7,1430	-1,0660	-55,4795
d3=cali+tor	-7,5247	0,8812	-55,2644
tor1	-6,5049	-2,0022	-55,0490
tor1+d1	0,6381	-0,9362	0,4305
tor1+d2	-6,5049	-2,0022	-55,0490
tor1+d3	-14,0296	-1,1210	-110,3134
tor1-d1	-13,6479	-3,0682	-110,5285
tor1-d2	7,7811	0,1298	55,9099
tor1-d3	1,0198	-2,8834	0,2154
d1-tor1	13,6479	3,0682	110,5285
d2-tor1	-7,7811	-0,1298	-55,9099
d3-tor1	-1,0198	2,8834	-0,2154
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	0,6381	-0,9362	0,4305
Diferencia	-0,5821	1,8362	-0,5770

Figura 72. Resultados obtenidos en los pares 1415 y 1516 por transformación

Como podemos observar los resultados obtenidos en ambos pares son completamente distintos y el resultado varía mucho del obtenido por orientación absoluta en la cámara primaria. Sin embargo este método junto con el de proyección y giro son los que nos ofrecen resultados más próximos al giro final, cosa que por proyecciones no ocurre.

Por Proyecciones:

Por proyecciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0932	0,7239
d1=cali-tor	-7,5247	0,8804	-0,6163
d2=tor-cali	7,5247	-0,8804	0,6163
d3=cali+tor	7,1430	1,0668	0,8314
tor1	6,8981	1,9255	15,5304
tor1+d1	-0,6266	2,8059	14,9141
tor1+d2	14,4228	1,0451	16,1467
tor1+d3	14,0411	2,9923	16,3618
tor1-d1	14,4228	1,0451	16,1467
tor1-d2	-0,6266	2,8059	14,9141
tor1-d3	-0,2449	0,8587	14,6990
d1-tor1	-14,4228	-1,0451	-16,1467
d2-tor1	0,6266	-2,8059	-14,9141
d3-tor1	0,2449	-0,8587	-14,6990
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-0,2449	0,8587	14,6990
Diferencia	0,3009	0,0413	-14,8455

Por proyecciones			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0932	0,7239
d1=cali-tor	-7,5247	0,8804	-0,6163
d2=tor-cali	7,5247	-0,8804	0,6163
d3=cali+tor	7,1430	1,0668	0,8314
tor1	6,5049	2,0152	17,1498
tor1+d1	-1,0198	2,8956	16,5335
tor1+d2	14,0296	1,1348	17,7661
tor1+d3	13,6479	3,0820	17,9812
tor1-d1	14,0296	1,1348	17,7661
tor1-d2	-1,0198	2,8956	16,5335
tor1-d3	-0,6381	0,9484	16,3184
d1-tor1	-14,0296	-1,1348	-17,7661
d2-tor1	1,0198	-2,8956	-16,5335
d3-tor1	0,6381	-0,9484	-16,3184
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-0,6381	0,9484	16,3184
Diferencia	0,6941	-0,0484	-16,4649

Figura 73. Resultados obtenidos en los pares 1415 y 1516 por proyecciones

Por Proyecciones y giro:

Por proyecciones y giros			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0955	0,1075
d1=cali-tor	-7,5247	0,8781	0,0000
d2=tor-cali	7,5247	-0,8781	0,0000
d3=cali+tor	7,1430	1,0691	0,2150
tor1	6,8981	1,9684	0,1075
tor1+d1	-0,6266	2,8465	0,1075
tor1+d2	14,4228	1,0903	0,1075
tor1+d3	14,0411	3,0375	0,3225
tor1-d1	14,4228	1,0903	0,1075
tor1-d2	-0,6266	2,8465	0,1075
tor1-d3	-0,2449	0,8993	-0,1075
d1-tor1	-14,4228	-1,0903	-0,1075
d2-tor1	0,6266	-2,8465	-0,1075
d3-tor1	0,2449	-0,8993	0,1075
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-0,2449	0,8993	-0,1075
Diferencia	0,3009	0,0007	-0,0390

Por proyecciones y giros			
	omega	phi	kappa
Calibración	-0,1908	0,9736	0,1075
global-tor	7,3338	0,0955	0,1075
d1=cali-tor	-7,5247	0,8781	0,0000
d2=tor-cali	7,5247	-0,8781	0,0000
d3=cali+tor	7,1430	1,0691	0,2150
tor1	6,5049	2,0549	0,1075
tor1+d1	-1,0198	2,9330	0,1075
tor1+d2	14,0296	1,1768	0,1075
tor1+d3	13,6479	3,1240	0,3225
tor1-d1	14,0296	1,1768	0,1075
tor1-d2	-1,0198	2,9330	0,1075
tor1-d3	-0,6381	0,9858	-0,1075
d1-tor1	-14,0296	-1,1768	-0,1075
d2-tor1	1,0198	-2,9330	-0,1075
d3-tor1	0,6381	-0,9858	0,1075
OA Toma1	0,0560	0,9000	-0,1465
FINAL	-0,6381	0,9858	-0,1075
Diferencia	0,6941	-0,0858	-0,0390

Figura 74. Resultados obtenidos en los pares 1415 y 1516 por proyecciones y giro





#### 4. ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS



## 4.1 Introducción

En este apartado vamos a valernos de la estadística para realizar el análisis de los resultados. La estadística es la herramienta fundamental que permite llevar a cabo el proceso relacionado con la investigación científica y que estudia la captura, organización, análisis y presentación de un conjunto de datos, tanto para la deducción de conclusiones como para la toma de decisiones. Tal conjunto de datos se denomina población, que puede ser finita o infinita, y de ella se observa una pequeña parte que es la muestra.

El objetivo de este apartado es determinar la calidad de los datos adquiridos y para ello utilizaremos una serie de estándares estadísticos de control de calidad para cartografía.

### Calidad posicional

Hoy en día, la calidad es un tema de vital importancia en nuestra sociedad moderna y una de las bases para la mejora continua de las empresas u organismos y de su competitividad. Ante este nuevo reto los productos cartográficos no pueden quedarse al margen.

El hecho de realizar un control de calidad posicional de la cartografía, nos ofrece una última verificación antes de entregarla al comprador. No cabe duda que este hecho supondrá un valor añadido a nuestros productos, ofreciendo una garantía final en lo que se refiere a uno de los factores más importantes en cartografía: la ubicación de los elementos representados en el territorio. Nuestros mapas perderían gran parte de su valor si no se comprueba que lo que hemos cartografiado realmente se encuentra donde decimos que está.

## 4.2 Procesos de control de calidad cartográfica

Una definición aceptada y amplia de calidad es la que considera como tal la totalidad de las características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer unas necesidades implícitas y explícitas. Junto a este concepto se habla también de gestión de la calidad, entendiendo por ello aquellas actividades, englobadas en la gestión general, que tienen por objeto implantar y determinar la política de la calidad, los objetivos y las responsabilidades mediante la planificación de la calidad, el control de la calidad, el aseguramiento de la calidad y la mejora de la calidad. El aseguramiento de la calidad se refiere al conjunto de acciones planificadas y sistemáticas que son necesarias para proporcionar la confianza de que un producto o servicio satisface los requisitos referentes a la calidad. Por tanto, un sistema de calidad es el conjunto de la estructura organizativa, de responsabilidades, de procedimientos, de procesos y de recursos que se establecen para llevar a cabo la gestión de la calidad.

Las normas ISO, serie 9000, establecen un marco para el control de la calidad en cualquier producto o proceso.



## Descripción de los estándares de calidad posicional empleados en cartografía:

Desde el punto de vista de la calidad posicional de los mapas topográficos existen diversos test o métodos que permiten hacer el seguimiento de la exactitud posicional  $X$ ,  $Y$  y/o  $Z$  del mapa. Al basarse en procedimientos estadísticos, podremos fijar ciertos niveles de confianza con los que queramos obtener nuestros resultados. No obstante, siempre deberemos partir de la hipótesis de normalidad en la distribución de los errores. Este aspecto es perfectamente asumible siempre y cuando el número de datos sea lo suficientemente amplio.

Todos los test empleados se basan en la comparación del mapa con una fuente de mayor exactitud. Ésta podrá ser bien un mapa de mayor exactitud (cartografía a escala significativamente superior y/o con una mayor calidad posicional controlada previamente), o bien datos tomados sobre el terreno con una exactitud superior a la de la cartografía a analizar. En nuestro caso emplearemos el estándar NSSDA.

El NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) fue creado por el FGDC (Federal Geographic Data Committee) en 1998. Las agencias federales de los Estados Unidos que realicen labores de producción de datos cartográficos analógicos y/o digitales han de cumplir con los estándares del FGDC de acuerdo con el estándar NSSDA.

### 4.3 Utilización del NSSDA

Hay siete pasos en la aplicación de la NSSDA:

1. Determinar si el test consiste en precisión horizontal, precisión vertical o ambas.
2. Seleccionar un conjunto de puntos test del conjunto de datos a evaluar.
3. Seleccionar un conjunto de datos independiente de mayor precisión que corresponda al conjunto de datos que se está evaluando.
4. Registrar mediciones de puntos idénticos de cada una de esas dos fuentes.
5. Calcular una estadística de la exactitud posicional usando la hoja de cálculo proporcionada.
6. Preparar una declaración de exactitud en un Informe normalizado.
7. Incluir ese informe en una descripción completa del conjunto de datos llamado metadatos.

Pasos en detalle:

1. Determinar qué prueba usar. El primer paso en la aplicación de la NSSDA es identificar las características espaciales del conjunto de datos que se está evaluando, separándolos entre planimetría y altimetría.



2. Selección de puntos test. La exactitud de un conjunto de datos es evaluada con las coordenadas de varios puntos del conjunto de datos comparándolas con las coordenadas de los puntos de un conjunto de datos independiente de mayor precisión. Los puntos utilizados para esta comparación deben estar bien definidos (estos puntos serán los obtenidos en campo). Deben ser fáciles de encontrar y medir en el conjunto de datos que se está evaluando y en el conjunto de datos independiente.

Para los datos derivados de mapas a escala de 1:5,000 o menor, funcionan bien los puntos encontrados en las intersecciones ortogonales de entidades lineales. Para datos derivados de mapas a escalas más grandes que 1:5000, entidades como accesos cubiertos, intersecciones de aceras, bordillos o canales son puntos adecuados. Para conjuntos de datos topográficos, monumentos o puntos bien marcados proporcionan puntos test excelentes.

Se requieren veinte o más puntos test para realizar una evaluación de la exactitud estadísticamente significativa independientemente del tamaño del conjunto de datos o del área de cobertura. Veinte puntos hacen un cálculo en el nivel de confianza de 95 por ciento razonable. El nivel de confianza de 95 por ciento significa que cuando se prueban los 20 puntos, es aceptable que un punto no supere la exactitud calculada.

3. Seleccionar un conjunto de datos independiente. El conjunto de datos independiente debe adquirirse por separado del conjunto de datos que se está probando. Debe ser de la más alta precisión disponible. En general, el conjunto de datos independiente debe ser tres veces más preciso que la exactitud esperada del conjunto de datos test. Desafortunadamente, esto no es siempre posible ni práctico. Si no se encuentra un conjunto de datos independiente que cumple con este criterio, puede usarse un conjunto de datos de la máxima precisión posible. La exactitud del conjunto de datos independiente siempre debe ser informada en los metadatos.

La extensión del conjunto de datos independiente debe aproximarse al conjunto de datos original. Cuando el conjunto de datos de prueba cubre un área rectangular y se cree que tiene una exactitud uniforme, una distribución ideal de puntos test permite al menos el 20 por ciento en cada cuadrante. Los puntos test deben estar espaciados a intervalos de al menos el 10 por ciento de la distancia diagonal del conjunto de datos.



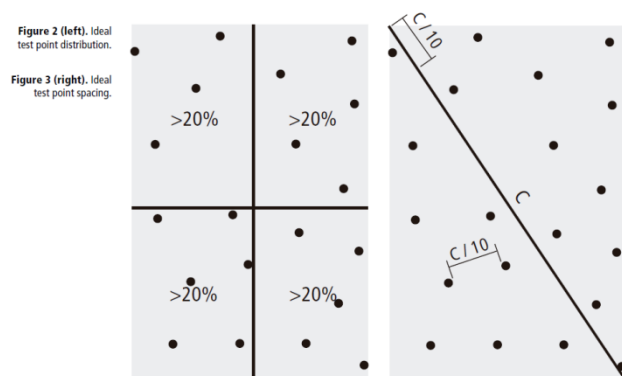


Figura 75. Requisitos para realizar el control de calidad

No siempre es posible encontrar puntos test distribuidos uniformemente. Cuando un conjunto independiente de datos cubre sólo una parte de un conjunto de datos de prueba, puede utilizarse para probar la exactitud de la zona de superposición. El objetivo en la selección de un conjunto de datos independiente es tratar de lograr un equilibrio entre uno que es más preciso que el conjunto de datos que se está probando y que cubre la misma región.

En nuestro caso los puntos no cumplían los requisitos previos ya que había un exceso de datos, por lo tanto tuvimos que seleccionar una muestra final de 32 puntos en vez de los 50 que teníamos previamente.

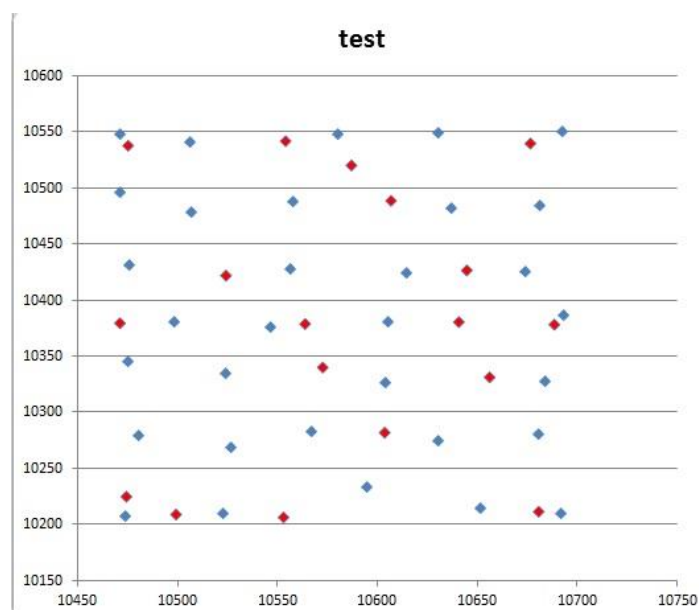


Figura 76. Distribucion de los puntos del test y selección de la muestra (puntos azules)

4. Registro de valores de medición. El siguiente paso es recoger coordenadas de puntos test en el conjunto de datos de prueba y el conjunto de datos independiente.



Al recoger estos números, es importante registrarlos en formato numérico adecuado y similar. Por ejemplo, si va a probar una base de datos digital con una exactitud esperada de unos 10 metros, sería excesivo registrar los valores de coordenadas con el sexto decimal; el metro más cercano sería adecuado. Usar un sentido común similar al registrar la estadística de exactitud.

5. Cálculo de la estadística de la exactitud. Una vez las coordenadas para cada punto test del conjunto de datos de prueba y el conjunto de datos independiente han sido determinadas, la estadística de la exactitud posicional puede ser calculada usando la hoja de cálculo de estadística adecuada.

La estadística NSSDA se calcula primero rellorando la información solicitada en la tabla correspondiente y luego calculando tres valores:

- La suma del conjunto de diferencias al cuadrado entre los valores de coordenadas del conjunto de datos de prueba y los valores de coordenadas del conjunto de datos independiente.
- El promedio de la suma dividiendo la suma por el número de puntos test que se está evaluando.
- El error cuadrático, que es simplemente la raíz cuadrada de la media.

La estadística NSSDA se determina multiplicando el RMSE por un valor que representa el error estándar de la media en el nivel de confianza del 95%: 1.7308 al calcular la exactitud horizontal y 1.9600 en el cálculo de la exactitud vertical.

#### 4.4 Tablas de resultados

A continuación se muestran las tablas tanto de planimetría como de altimetría comparando los resultados obtenidos en campo con los obtenidos mediante pares fotogramétricos con la cámara primaria. El resto de los procedimientos no nos han ofrecido resultados válidos por lo tanto no podremos incluirlos en el estudio.

Crearemos una tabla para las coordenadas obtenidas con el par 4-5 y otra para las obtenidas con el par 5-6. Todo el estudio estadístico lo realizaremos con las coordenadas en mm, y por lo tanto los resultados obtenidos también estarán expresados en mm.

### Diferencias coordenada x:

A Point number	B Point description	C x (independent)	D x (test)	E diff in x	F (diff in x) <sup>2</sup>
101		10471,099	10471,202	-0,103	0,010609
103		10506,39	10506,531	-0,141	0,019881
105		10579,946	10579,996	-0,05	0,0025
106		10630,195	10630,253	-0,058	0,003364
108		10692,393	10692,381	0,012	0,000144
110		10471,43	10471,517	-0,087	0,007569
111		10507,091	10507,17	-0,079	0,006241
112		10557,469	10557,573	-0,104	0,010816
114		10637,251	10637,333	-0,082	0,006724
115		10681,46	10681,564	-0,104	0,010816
116		10476,113	10476,178	-0,065	0,004225
118		10556,078	10556,138	-0,06	0,0036
119		10614,356	10614,449	-0,093	0,008649
121		10673,892	10673,899	-0,007	4,9E-05
123		10498,33	10498,415	-0,085	0,007225
124		10546,354	10546,334	0,02	0,0004
126		10604,974	10605,059	-0,085	0,007225
129		10692,955	10693,004	-0,049	0,002401
130		10474,885	10475,022	-0,137	0,018769
131		10524,195	10524,265	-0,07	0,0049
133		10604,104	10604,174	-0,07	0,0049
135		10683,974	10684,088	-0,114	0,012996
136		10480,515	10480,609	-0,094	0,008836
137		10526,603	10526,688	-0,085	0,007225
138		10566,649	10566,717	-0,068	0,004624
140		10630,299	10630,467	-0,168	0,028224
141		10680,496	10680,584	-0,088	0,007744
143		10473,561	10473,700	-0,139	0,019321
145		10522,587	10522,732	-0,145	0,021025
147		10594,51	10594,629	-0,119	0,014161
148		10651,487	10651,586	-0,099	0,009801
150		10691,877	10691,915	-0,038	0,001444

A Point number	B Point description	C x (independent)	D x (test)	E diff in x	F (diff in x) <sup>2</sup>
101		10471,099	10471,21	-0,111	0,012321
103		10506,39	10506,48	-0,09	0,0081
105		10579,946	10579,926	0,02	0,0004
106		10630,195	10630,144	0,051	0,002601
108		10692,393	10692,303	0,09	0,0081
110		10471,43	10471,451	-0,021	0,000441
111		10507,091	10507,076	0,015	0,000225
112		10557,469	10557,428	0,041	0,001681
114		10637,251	10637,185	0,066	0,004356
115		10681,46	10681,407	0,053	0,002809
116		10476,113	10476,076	0,037	0,001369
118		10556,078	10556,055	0,023	0,000529
119		10614,356	10614,35	0,006	3,6E-05
121		10673,892	10673,785	0,107	0,011449
123		10498,33	10498,228	0,102	0,010404
124		10546,354	10546,205	0,149	0,022201
126		10604,974	10604,981	-0,007	4,9E-05
129		10692,955	10692,78	0,175	0,030625
130		10474,885	10474,806	0,079	0,006241
131		10524,195	10524,088	0,107	0,011449
133		10604,104	10604,046	0,058	0,003364
135		10683,974	10683,944	0,03	0,0009
136		10480,515	10480,48	0,035	0,001225
137		10526,603	10526,529	0,074	0,005476
138		10566,649	10566,542	0,107	0,011449
140		10630,299	10630,322	-0,023	0,000529
141		10680,496	10680,471	0,025	0,000625
143		10473,561	10473,512	0,049	0,002401
145		10522,587	10522,506	0,081	0,006561
147		10594,51	10594,481	0,029	0,000841
148		10651,487	10651,427	0,06	0,0036
150		10691,877	10691,801	0,076	0,005776

Figura 77. Diferencias de coordenadas x en el par 4-5 y en el par 5-6

### Diferencias coordenada y y estándar NSSDA en planimetría:

A Point number	G y (independent)	H y (test)	I diff in y	J (diff in y) <sup>2</sup>	K (diff in x) <sup>2</sup> + (diff in y) <sup>2</sup>
101	10548,653	10548,661	-0,008	6,4E-05	0,010673
103	10541,362	10541,281	0,081	0,006561	0,026442
105	10547,908	10547,833	0,075	0,005625	0,008125
106	10549,049	10548,951	0,098	0,009604	0,012968
108	10550,507	10550,391	0,116	0,013456	0,0136
110	10496,221	10496,192	0,029	0,000841	0,00841
111	10479,045	10479,023	0,022	0,000484	0,006725
112	10487,78	10487,641	0,139	0,019321	0,030137
114	10481,858	10481,842	0,016	0,000256	0,00698
115	10484,611	10484,494	0,117	0,013689	0,024505
116	10431,06	10431,098	-0,038	0,001444	0,005669
118	10428,082	10428,035	0,047	0,002209	0,005809
119	10424,934	10424,915	0,019	0,000361	0,00901
121	10425,55	10425,441	0,109	0,011881	0,01193
123	10380,969	10380,933	0,036	0,001296	0,008521
124	10376,413	10376,379	0,034	0,001156	0,001556
126	10380,385	10380,33	0,055	0,003025	0,01025
129	10386,993	10386,959	0,034	0,001156	0,003557
130	10345,631	10345,632	-0,001	1E-06	0,01877
131	10334,339	10334,358	-0,019	0,000361	0,005261
133	10326,619	10326,763	-0,144	0,020736	0,025638
135	10327,914	10327,967	-0,053	0,002809	0,015805
136	10278,904	10278,91	-0,006	3,6E-05	0,008872
137	10268,565	10268,673	-0,108	0,011664	0,018889
138	10283,369	10283,377	-0,008	6,4E-05	0,004688
140	10274,595	10274,58	0,015	0,000225	0,028449
141	10280,72	10280,758	-0,038	0,001444	0,009188
143	10207,01	10207,108	-0,098	0,009604	0,028925
145	10209,5	10209,63	-0,13	0,0169	0,037925
147	10232,95	10233,038	-0,088	0,007744	0,021905
148	10214,215	10214,241	-0,026	0,000676	0,010477
150	10209,243	10209,374	-0,131	0,017161	0,018605
sum					0,458262
average					0,01432069
RMSE					0,11966907
NSSDA					0,20712323

A Point number	G y (independent)	H y (test)	I diff in y	J (diff in y) <sup>2</sup>	K (diff in x) <sup>2</sup> + (diff in y) <sup>2</sup>
101	10548,653	10548,627	0,026	0,000676	0,012997
103	10541,362	10541,413	-0,051	0,002601	0,010701
105	10547,908	10547,913	-0,005	2,5E-05	0,000425
106	10549,049	10549,027	0,022	0,000484	0,003085
108	10550,507	10550,499	0,008	6,4E-05	0,008164
110	10496,221	10496,284	-0,063	0,003969	0,00441
111	10479,045	10479,176	-0,131	0,017161	0,017386
112	10487,78	10487,819	-0,039	0,001521	0,003202
114	10481,858	10482,012	-0,154	0,023716	0,028072
115	10484,611	10484,631	-0,02	0,0004	0,003209
116	10431,06	10431,235	-0,175	0,030625	0,031994
118	10428,082	10428,21	-0,128	0,016384	0,016913
119	10424,934	10425,034	-0,1	0,01	0,010036
121	10425,55	10425,607	-0,057	0,003249	0,014698
123	10380,969	10381,113	-0,144	0,020736	0,03114
124	10376,413	10376,505	-0,092	0,008464	0,030665
126	10380,385	10380,44	-0,055	0,003025	0,003074
129	10386,993	10387,094	-0,101	0,010201	0,040826
130	10345,631	10345,71	-0,079	0,006241	0,012482
131	10334,339	10334,478	-0,139	0,019321	0,03077
133	10326,619	10326,849	-0,23	0,0529	0,056264
135	10327,914	10328,116	-0,202	0,040804	0,041704
136	10278,904	10278,928	-0,024	0,000576	0,001801
137	10268,565	10268,763	-0,198	0,039204	0,04468
138	10283,369	10283,546	-0,177	0,031329	0,042778
140	10274,595	10274,667	-0,072	0,005184	0,005713
141	10280,72	10280,882	-0,162	0,026244	0,026869
143	10207,01	10207,065	-0,055	0,003025	0,005426
145	10209,5	10209,561	-0,061	0,003721	0,010282
147	10232,95	10233,045	-0,095	0,009025	0,009866
148	10214,215	10214,316	-0,101	0,010201	0,013801
150	10209,243	10209,488	-0,245	0,060025	0,065801
sum					0,639234
average					0,01997606
RMSE					0,1413367
NSSDA					0,24462556

Figura 78. Diferencias de coordenadas y y estándar planímetro en el par 4-5 y en el par 5-6



Como podemos observar los resultados en planimetría tras aplicar el estándar estadístico son válidos ya que entran en tolerancia ( $\pm 1\text{mm}$ ), incluso el valor del NSSDA en ambos pares fotogramétricos se encuentra por debajo del tamaño del pixel en el objeto ( $0,265\text{mm}$ ). También comprobamos que obtenemos medidas más precisas en el par 4-5 que en el par 5-6, aunque la diferencia estará por debajo de la centésima de mm.

Diferencias coordenada z y estándar NSSDA en altimetría:

A Point number	B Point description	C z (independent)	D z (test)	E diff in z	F (diff in z) <sup>2</sup>	A Point number	B Point description	C z (independent)	D z (test)	E diff in z	F (diff in z) <sup>2</sup>
101		10018,619	10018,401	0,218	0,047524	101		10018,619	10018,683	-0,064	0,004096
103		10009,629	10010,037	-0,408	0,166464	103		10009,629	10009,621	0,008	6,4E-05
105		10009,98	10010,069	-0,089	0,007921	105		10009,98	10009,762	0,218	0,047524
106		10013,02	10013,07	-0,05	0,0025	106		10013,02	10013,018	0,002	4E-06
108		10016,191	10016,268	-0,077	0,005929	108		10016,191	10016,096	0,095	0,009025
110		10013,256	10013,37	-0,114	0,012996	110		10013,256	10013,199	0,057	0,003249
111		10026,961	10026,937	0,024	0,000576	111		10026,961	10026,951	0,01	0,0001
112		10046,8	10046,818	-0,018	0,000324	112		10046,8	10046,801	-0,001	1E-06
114		10026,916	10026,854	0,062	0,003844	114		10026,916	10026,904	0,012	0,000144
115		10016,906	10016,907	-0,001	1E-06	115		10016,906	10016,914	-0,008	6,4E-05
116		10009,318	10009,348	-0,03	0,0009	116		10009,318	10009,228	0,09	0,0081
118		10019,799	10019,8	-0,001	1E-06	118		10019,799	10019,797	0,002	4E-06
119		10035,941	10036,015	-0,074	0,005476	119		10035,941	10036,365	-0,424	0,179776
121		10029,392	10029,422	-0,03	0,0009	121		10029,392	10029,393	-0,001	1E-06
123		10033,226	10033,222	0,004	1,6E-05	123		10033,226	10032,933	0,293	0,085849
124		10028,529	10028,42	0,109	0,011881	124		10028,529	10028,187	0,342	0,116964
126		10025,358	10025,356	0,002	4E-06	126		10025,358	10025,822	-0,464	0,215296
129		10018,27	10018,241	0,029	0,000841	129		10018,27	10019,273	-1,003	1,006009
130		10008,575	10008,578	-0,003	9E-06	130		10008,575	10008,251	0,324	0,104976
131		10033,557	10033,548	0,009	8,1E-05	131		10033,557	10033,336	0,221	0,048841
133		10031,356	10031,36	-0,004	1,6E-05	133		10031,356	10031,356	0	0
135		10029,076	10029,077	-0,001	1E-06	135		10029,076	10029,41	-0,334	0,111556
136		10013,473	10013,48	-0,007	4,9E-05	136		10013,473	10013,015	0,458	0,209764
137		10030,007	10030,009	-0,002	4E-06	137		10030,007	10029,999	0,008	6,4E-05
138		10044,413	10044,418	-0,005	2,5E-05	138		10044,413	10044,421	-0,008	6,4E-05
140		10032,746	10032,747	-0,001	1E-06	140		10032,746	10032,923	-0,177	0,031329
141		10034,137	10034,138	-0,001	1E-06	141		10034,137	10034,356	-0,219	0,047916
143		10014,842	10014,874	-0,032	0,001024	143		10014,842	10014,596	0,246	0,060516
145		10032,678	10032,934	-0,256	0,065536	145		10032,678	10032,625	0,053	0,002809
147		10051,041	10051,45	-0,409	0,167281	147		10051,041	10051,073	-0,032	0,001024
148		10042,71	10042,72	-0,01	0,0001	148		10042,71	10043,053	-0,343	0,117649
150		10035,462	10035,471	-0,009	8,1E-05	150		10035,462	10036,052	-0,59	0,3481
sum					0,502307	sum					2,760923
average					0,01569709	average					0,08627884
RMSE					0,12528804	RMSE					0,29373261
NSSDA					0,24556456	NSSDA					0,57571591

Figura 79. Diferencias de coordenadas z en el par 4-5 y en el par 5-6 y estándar altimétrico

En altimetría la precisión alcanzada será peor que en la obtenida en planimetría; aun así estará dentro de tolerancia. Observamos que en este caso la diferencia entre un par y otro será mayor, siendo ésta de 0,3 mm.



## 5. CONCLUSIONES



Tras analizar los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto fin de carrera hemos llegado a una serie de conclusiones:

- El trabajo realizado es real y completo, en el que se ha podido profundizar y poner en práctica los conocimientos de Fotogrametría y Topografía adquiridos en la carrera.
- La Fotogrametría de objeto cercano, como técnica utilizada en este proyecto, nos permite realizar todo el proceso con una cámara convencional sin necesidad de utilizar cámaras métricas o sistemas de láser escáner. Para ello necesitamos realizar una adecuada calibración geométrica de forma imprescindible, teniendo que las cámaras tienen un comportamiento inestable en el tiempo, con lo que habría que realizarla para cada proyecto, en función de las características geométricas del mismo y según una metodología verificada y contrastada.
- La utilización de técnicas e instrumentación propias de Topografía Industrial ha permitido realizar la transformación de coordenadas in situ durante la toma de datos. Esto es un gran avance ya que se han obtenido coordenadas junto con sus residuos (estando estos dimensionados y totalmente por debajo de la tolerancia preestablecida) de formas más rápida y fiable que a posteriori en gabinete.
- La calibración realizada en campo nos ofrece mejores resultados dejando la cámara fija que los obtenidos con la primera medición donde se dejó, por el contrario, el panel fijo.
- Realizar la orientación de pares fotogramétricos de la cámara primaria por correlación nos ha permitido obtener mejores resultados y realizar las orientaciones de forma más rápida y libre de errores accidentales del operador.
- La incertidumbre en el valor del ángulo kappa nos supone un posible error en el cálculo de los ángulos de giro de la orientación directa.
- Al no tener resultados óptimos de la orientación directa no se ha podido llevar a cabo el estudio entre las distintas metodologías para comprobar su viabilidad.
- Se ha utilizado la calidad posicional para el análisis matemático entre las coordenadas obtenidas en campo y las obtenidas por correlación. El resultado del análisis ha sido positivo entrando las precisiones en la tolerancia impuesta a priori ( $\pm 1\text{mm}$ ).
- No podemos comprobar la bondad del análisis con el resto de coordenadas ya que no hemos podido obtenerlas por los métodos que incluyen la orientación directa.



Como posibles soluciones a nuestro problema se plantea:

- La utilización de un sensor de orientación solidario a la cámara durante la medición en laboratorio para medir los giros de la cámara en ambos sistemas.
- Un posible proyecto fin de carrera que estudie este proyecto en detalle para localizar el error y añadir mejoras para obtener un resultado positivo. Al ser la determinación del ángulo kappa la que da más problemas se podría partir de dicho ángulo en vez de hacerlo del ángulo omega.



## 6. PRESUPUESTO



- Tabla de costes por hora en recursos humanos

Recursos Humanos	€/hora
Ingeniero Técnico en Topografía (campo)	50
Ingeniero Técnico en Topografía (gabinete)	30
Técnico de Restitución	20

Se establecen los costes por hora según la situación actual del mercado

- Tabla de costes totales en recursos humanos

Recursos Humanos	Total de horas	€/hora	Cantidad	Total euros
Ingeniero Técnico en Topografía (campo)	16	50	1	800
Ingeniero Técnico en Topografía (gabinete)	120	30	1	3600
Técnico de Restitución	160	20	1	3200
				<b>7600</b>

- Tabla de costes de materiales por precio unitario

Tipo	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Días	Total euros
<b>Material Fotogramétrico</b>	Cámara fotográfica	28	2	2	112
	Trípode	5	1	2	10
	Panel de calibración	15	1	1	15
	Panel de test	15	1	1	15
<b>Material Topográfico</b>	Estación total leica	70	1	2	140
	Teodolito electrónico leica	70	1	2	140
	Trípodes industriales	20	2	2	80
	Barra calibrada	70	1	2	140
					<b>652</b>



- Tabla de costes de licencias de software por precio unitario

Concepto	Precio unitario	Días	Total euros
Leica Axyz	5	2	10
Digi3D	10	40	400
Calibra de Aerotri	10	2	20
Matlab	10	5	50
			<b>480</b>

- Tabla resumen del presupuesto

Concepto	Total euros
Recursos humanos	7600
Material	652
Licencias de software	480
<b>8732</b>	

	Parcial	Total euros
Beneficio empresarial (15%)	1309,8	10041,8
IVA (21%)	2108,778	12150,578
Total con IVA		12150,578



## 7. BIBLIOGRAFÍA



Aguirre, Julián y Diez, Andrés. Apuntes de Fotogrametría.

Álvarez, Roberto; Camacho, Roberto y Jiménez, Ángela (2014). Modelización Tridimensional del Galeón Flamenco del Museo Naval de Madrid por métodos fotogramétricos. Proyecto Fin de Carrera. ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. UPM

Atkinson Gordo, Alan D.J (Dirigida por Dr. D. Francisco Javier Ariza López) (2005). Control de calidad posición en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejora. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén.

Atkinson Gordo, Alan D.J. Diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía.

Axyz Data Manager: Software Reference Manual para Axyz v. 1.4 (Dr. Stephen Kyle, Enero 2000 - Ref. 722 233).

Barrio, Emma y Chueca, Rosa Mariana. Apuntes de Aplicaciones Industriales.

Berthorl, K.P-Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions.

Blanco, Javier y Mena, Lorenzo (2014). Modelización tridimensional de una figura por métodos fotogramétricos y escaneado de precisión. Verificación y comparación de resultados. Proyecto Fin de Carrera. ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. UPM

Gallardo, Elena (2013). Modelización tridimensional de la pieza MNM-23 del Museo Naval de Madrid por métodos fotogramétricos. Proyecto Fin de Carrera. ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. UPM

Manual Calibra de Digi3D.

Manual de exactitud posicional: NSSDA.

Manual MatLab 7.0.

Martínez, Marina. Apuntes de Fotogrametría II.



